APRIL 2004 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

> Älteste Spuren des Lebens

> Genialer Urtaschenrechner

> Historische Heiratsverbote

> Zu früher Frühling bedroht Ökosysteme

www.spektrum.de

SEUCHEN

Großangriff auf AIDS

Wie Forscher mit neuen Tricks gegen das HIV vorgehen



URMENSCHEN

Vorfahren der Ur-Europäer?

ASTROPHYSIK

Dynamische Milchstraße



SONDERTEIL

Wo Deutschlands Forscher Spitze sind

D6179E
13,50 sFr/Luxemburg 8,– €
04
4 194058 406900



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Und sie hatte doch Recht

Wenn jemand in der Wissenschaft mit einer neuen Idee aufwartet, dann braust nicht immer gleich Beifall auf. Das betrifft auch Entdeckungen oder Funde, die zwar als solche nicht bestreitbar sind, über deren Interpretation aber gezankt werden kann. In der Regel geht eine solche Debatte zu Lasten der »Entdecker«, zumal wenn sie noch jung sind und somit ohne akademische Lehrstuhl-Würden.

Wovon ich rede? Im Sommer 1999 stieß ein Team georgischer, deutscher und amerikanischer Archäologen und Paläanthropologen im südlichen Kaukasus (in dem Ort Dmanisi) auf mehrere Schädel einer Hominidenart, die sie als etwa 1,7 Millionen Jahre alte Exemplare der Spezies *Homo erectus* einstuften, einem Vorläufer des *Homo sapiens*.

Eine Publikation im Fachblatt »Science« im Jahre 2000 machte Schlagzeilen in internationalen Medien: »Fossilien erster menschlicher Migrationen gefunden«, titelte etwa die »New York Times«. Die bis dahin akzeptierte Vorstellung, dass diese Hominidenart erst eine Million Jahre später Afrika verlassen hatte, war vom Tisch gefegt – so weit, so gut.

Dabei hatte schon etliche Jahre zuvor, 1991, eine deutsche Doktorandin an dieser Fundstelle als Erste einen menschlichen Unterkieferknochen ausgegraben; sie konnte das Alter sogleich auf mindestens 1,5 Millionen Jahre taxieren. Als sie und zwei georgische Kollegen aber im Herbst des gleichen Jahres ihren Sensationsfund auf einem Workshop im Frankfurter Senckenberg-Museum präsentierten, waren sich die internationalen Experten rasch einig: Es konnte kein *Homo erectus* sein, eher eine spätere Menschenart, also musste das Alter falsch geschätzt sein. Antje Justus, so hieß die junge Forscherin, war demoralisiert. »Ich war schon etwas enttäuscht«, erinnert sie sich heute. Dennoch forschte sie mit einem erweiterten Team in Dmanisi weiter, bis die Gruppe 1999 die erwähnten Hominidenschädel ausgrub. Erst dann, nach acht Jahren, wurde Antje Justus' ursprünglicher Kieferfund international von der Fachwelt anerkannt.



Die Urgeschichtlerin Antje Justus vom Römisch-Germanischen Zentralmuseum in Mainz

Die Episode zeigt (diesmal mit Happy End), dass der »menschliche Faktor« eben auch in der Forschung eine große Rolle spielt. Die damalige Doktorandin Justus und ihre seriösen, aber unbekannten Kollegen aus Georgien brachten einfach nicht genügend »Autorität« aufs Podium, um eine solche, für die Fachwelt seinerzeit umwälzende These widerspruchslos durchsetzen zu können. Auch wenn Wissenschaftler neue Thesen und Entdeckungen von Kollegen ständig selbst bewerten, sind sie zugleich kaum frei von der Autorität, mit der Neues präsentiert wird. Das gilt vor allem dann, wenn gar eine kühne These aufgestellt wird, die lieb gewordene Theorien über den Haufen wirft und Unruhe ins eigene Fachgebiet bringt. Dabei sind es genau diese Momente, auf die die Wissenschaft ständig hinarbeitet: die Endeckung des Neuen (Seite 24).

APRIL 2004

SPEKTROGRAMM

8 Schwarzes Loch zerfetzt Stern · Platz sparende Smarties · Raketentreibstoff aus Bakterien · Uralter Parasit u. a.

11 **Bild des Monats**
Rattenschwanz im Rastermikroskop

FORSCHUNG AKTUELL

14 **Von der Ei- zur Stammzelle und zurück**
Erstmals Stammzellen aus geklonten menschlichen Embryonen erzeugt

19 **Biosensor für Giftalgen**
Neues Gerät zum Nachweis giftiger Geißeltierchen, die Algenblüten auslösen

21 **Videos vom Papier**
Flexible Folie mit schaltbaren Bildpunkten ermöglicht elektronische Zeitung

THEMEN

▶ 24 **Die ersten Eurasier**
Fossilien im Kaukasus belegen unerwartet frühes Debüt des Menschen in Europa

▶ 34 **Wettrüsten gegen HIV**
Mit welchen Strategien Forscher dem Resistenzproblem entgegentreten

▶ 46 **Jungbrunnen für die Milchstraße**
Wie die Galaxis ihren Aufbau und ihr Sterninventar permanent erneuert

▶ 56 **Zu frühes Frühjahr**
Globale Erwärmung bringt das Räderwerk der Nahrungsketten aus dem Takt

62 **Cluster-Explosionen**
Unter Laserbeschuss geben Molekülhaufen chemische Geheimnisse preis

▶ 70 **Streit um frühe Lebensspuren**
Die ältesten mutmaßlichen Hinweise auf Leben sind ins Zwielicht geraten

▶ 78 SPEKTRUM-ESSAY:
Eheverbote
Armut als Heiratshindernis

▶ 86 **Rechnen mit der Kurbel**
Mit der Curta-Rechenmaschine erfand Curt Herzstark den Taschenrechner

▶ **SONDERTEIL INNOVATION** NACH SEITE 94
Forschung und Entwicklung in Deutschland – Schwerpunkt Energie

Titelbild: Das Aids-Virus HIV, hier im Computermodell, hält Wissenschaftler seit 20 Jahren in Atem. Mit immer neuen Strategien versuchen sie den Erreger in Schach zu halten. *Bild: Ag. Focus / SPL*

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet

SEITE 24

MENSCHENEVOLUTION

Erste Urmenschen an den Pforten Europas

Unerwartet früh zogen Menschengruppen von Afrika nach Eurasien. In Dmanisi, am Südrand des Kaukasus, erschienen sie vor fast 1,8 Millionen Jahren



SEITE 46

ASTRONOMIE

Ewig junge Milchstraße

Lange hielten die Astronomen unser Sternsystem für eine alternde Diva – doch neue Forschungen zeigen, dass es höchst dynamisch ist und sich ständig erneuert



SEITE 56

KLIMAWANDEL

Wenn der Frühling zu früh kommt

Die Klimaerwärmung bringt Ökosysteme aus dem Gleichgewicht. So finden manche Vögel zur Brutzeit nicht mehr die geeignete Nahrung

SEITE 62

CHEMIE

Explodierende Molekülhaufen

Mit hochintensiven Laserpulsen lassen sich Molekülcluster zum Zerplatzen bringen. Sie enthüllen dabei Details über den Ablauf schneller chemischer Reaktionen



SEITE 70

BIOLOGIE

Wie alt ist das Leben wirklich?

So manche heiße Spur der ersten Organismen hat sich jetzt als trügerisch entpuppt. Vielleicht entwickelte sich das irdische Leben doch nicht so schnell wie bisher vermutet



TITELTHEMA HIV-THERAPIE

Großangriff auf Aids

Selbst ein Wirkstoffcocktail kann das Aids-Virus nur begrenzt in Schach halten. Neue Ansätze sollen den Erreger auch von ganz anderer Seite attackieren – und Resistenzentwicklungen hinauszögern

SEITE 78

BEVÖLKERUNGSPOLITIK

Heiratsverbote

Im 19. Jahrhundert schränkten mehrere deutsche Staaten das Heiraten drastisch ein, weil sie die Vermehrung der Armut fürchteten

SEITE 86

TECHNIKGESCHICHTE

Rechnen mit der Kurbel

Die CURTA Universal Rechenmaschine war klein, mechanisch und genial. Im Konzentrationslager rettete sie ihrem Erfinder das Leben





NACH SEITE 94

SONDERTEIL

Innovation in Deutschland

Während Politiker Innovationsfähnchen schwenken, entwickeln hiesige Forscher und Ingenieure Technologien von Weltrang – etwa in den Bereichen Energie, Biomedizin und Materialwissenschaften

REZENSIONEN

95 **Night Visions** von Joseph Scheer
Lexikon der Liebesmittel von Christian Rätsch und Claudia Müller-Ebeling
Der letzte Albatros von Diane Ackerman
Ein Esel lese nie von Karl Günter Kröber
Supramanie von Gunter Dueck

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

107 **Steine flitschen**

KOMMENTARE

16 **Ich, Klon**
Die »Drei Gesetze des Klonens«

20 **Am Rande**
Die bleifreie Kanone

22 **Glosse**
Deutschland sucht die Superuni

WISSENSCHAFT IM ...

44 **Alltag:** Hörgeräte – Orientierung auf der Cocktailparty

85 **Rückblick:** Die Peilscheibe der Nordkrieger u. a.

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial · 6 Leserbriefe/Impressum · 104 Preisrätsel · 110 Vorschau

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN

Leuchttürme im All

Einst wurden Pulsare für Kontaktanzeigen Außerirdischer gehalten. Heute helfen sie Astronomen bei der Jagd nach Exoplaneten.

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Wie wir lernen, die Welt zu begreifen

Februar 2004

Die im Artikel beschriebenen Forschungsergebnisse zur Entwicklung der Sinneswahrnehmung beim Säugling zeigen eindrucksvoll die einzelnen aufeinander aufbauenden Schritte. Der Artikel lässt jedoch auch erkennen, welch leichtsinnige Schlüsse von Forschern immer wieder aus dem Verhalten der Säuglinge gezogen werden.

Es ist aus der klassischen Säuglingsforschung (Piaget u. a.) bekannt, dass Kinder schon im ersten Lebensjahr Sinneseindrücke in der beschriebenen Art koordinieren. Daraus kann jedoch nicht gefolgert werden, junge Säuglinge würden sich als eigenständige Wesen erkennen. Eine solche Aussage negiert die aus diesem Prozess resultierenden Trennungsängste der Kinder und die Probleme der Mütter damit.

Ebenso wird auch hier wieder die offensichtlich falsche Interpretation von Meltzoff über die angeblich bewusste Nachahmung von Gesichtsausdrücken durch Neugeborene herangezogen. Diese Nachahmung wird von vielen Forschern als »motor mimicry« bezeichnet und ist auch bei älteren Kindern (zum Teil auch bei Erwachsenen) als reflexhafte Nachahmung feststellbar.

Dr. Erika Butzmann, Wildeshausen

Wie wählt man eine Fußballmannschaft?

Mathematische Unterhaltungen, Januar 2004

Auch bei mir wurde durch den Artikel so manche Kindheitserinnerung wachgerufen. Ich konnte gut scharfe Bälle werfen, und meine besondere Stärke war das Fangen eines Balls. Dennoch gab es eine Mitschülerin, die noch viel besser werfen konnte und deren Ball weder ich noch sonst einer direkt aus der Luft fangen konnte – sie war einfach unschlagbar.

Beide wurden wir (wohl aus Gründen der Beliebtheit und weniger aus strategischer Sicht) nicht als eines der ersten Mannschaftsmitglieder gewählt. Aber: Sobald eine von uns beiden ausgewählt wurde, konnte man sicher sein, dass die nächste Wahl auf die jeweils andere fiel.

Eine Strategie hängt also nicht nur von den Präferenzen des Auswählers ab, sondern auch von komplementären Beziehungen unter den Spielern. Dies wird in Ihrem Artikel leider nicht berücksichtigt.

Dr. Andrea Lochmahr, Wettstetten

Warum wir schlafen

Januar 2004

Wichtige Aspekte ausgelassen

Diese Übersetzung des amerikanischen Artikels »Why we sleep« berichtet über interessante Aspekte des REM-Schlafs. Allerdings wird der Non-REM-Schlaf nur sehr kurz gestreift, und deshalb ist das Thema »Schlaf« absolut unvollständig behandelt.

Außerdem fehlen neuere, publizierte Studien, vor allem aus dem europäischen Raum (zum Beispiel Born, Lübeck und aus anderen renommierten Instituten), die Zusammenhänge zwischen der Festigung von Lerninhalten und dem Schlaf (REM und Non-REM-Schlaf) belegen. Im Lichte dieser Studien erscheint Siegels Aussage »Die Belege … sind aber schwach und widersprüchlich …« als überholt.

Die Behauptung »Körpergröße bestimmt Schlafdauer« ist gerade als Überschrift irreführend. Die Schlafdauer hat neben der Spezies noch mit ganz anderen Faktoren zu tun, unter anderem mit Alter und Jahreszeit. Abgesehen davon zeigt schon die Abbildung auf den Seiten 34 und 35, dass hier allzu plakativ argumentiert wurde. So fehlen Löwe und Giraffe, und diese beiden großen Tiere – nach der Abbildung zwischen Mensch und Elefant – verhalten sich völlig verschieden: der Löwe schläft extrem lang, die Giraffe extrem kurz. Bei ihnen bestimmt eindeutig nicht die Körpergröße die Schlafdauer.

Übrigens: Elefanten schlafen im Zoo (nur dort kann man es relativ genau messen) 4 – 6,7 und nicht 3 Stunden (Angaben von Prof. Tobler, Zürich) und Menschen (in Deutschland) 7 und nicht 8 Stunden wie angegeben.

Fazit: Dieser Artikel lässt wichtige Aspekte des Schlafs (Tiefschlaf) genauso unberücksichtigt wie die neuere Literatur zu diesem Thema. Die Frage »Warum schlafen wir?« kann er deshalb nicht beantworten – und hat das auch nicht getan.

Prof. Dr. Jürgen Zulley, Regensburg

Hier das Nächstliegende

Warum bleibt das Nächstliegende in Hinblick auf die Frage: »Warum schlafen wir?« unerwähnt? Meine Antwort: Weil sich die Erde dreht. Was lag für die Evolution höherer Lebewesen näher, als die obwaltende Nacht-Dunkelpause für rekreative Funktionen zu nutzen?

Lothar Franke, Mainz

Das Rätsel des Mayakalenders

Januar 2004

Eine kleine Anmerkung zu Ihrem hochinteressanten Artikel: Herrscher oder König bedeutet im Maya nicht »ahaw«, sondern »ahau«. Vielleicht hat sich dieser Fehler eingeschlichen, weil in kolonialzeitlichen Mayatexten u und v des Öfteren mal durcheinander gebracht wurden. In der Aussprache besteht jedoch ein Unterschied.

Das u wird gesprochen wie unser u, ein v jedoch wie ein w. Einen Mayabuchstaben w gibt es nicht. Fällt man auf die Tücken kolonialzeitlicher Texte herein, ergeben sich leider Bedeutungsänderungen und nicht existente Wörter wie ahaw.

Astrid Slizewski, Hamburg

Klimakapriolen der Kreidezeit

Dezember 2003

Diesen Artikel habe ich mit sehr viel Interesse gelesen und bin dabei über die Angaben zum CO_2-Gehalt der Atmosphäre und der Temperaturdifferenz zu heute gestolpert. Der Fachliteratur entnehme ich, dass der CO_2-Einfluss auf den Treibhauseffekt etwa zwanzig Prozent beträgt und dass fast der ganze »Rest« vom Wasserdampf bewirkt wird, im Gegensatz zur Zusammenfassung am Ende Ihres Artikels. Den Autoren Ihres Artikels ist das sicher ebenso bekannt wie Ihren



THOMAS WAGNER

Schwarzschiefer und karbonatreiche Zwischenlagen wechseln sich in diesen Sedimentdecken bei Tarfaya, Marokko, ab.

Fachredakteuren. Umso unverständlicher ist es daher für mich, dass so interessante Erkenntnisse über die Klimageschichte mit einer billigen Polemik gegen »das CO_2« garniert werden. Von einer Zeitschrift mit wissenschaftlichem Anspruch erwarte ich mehr Sachlichkeit und eine wesentlich gründlichere Diskussion solcher Forschungsergebnisse statt grüner Glaubensbekenntnisse.

Auch die These zur Schieferbildung (»Ozean weltweit umgekippt«) ließe sich nach einem Besuch des Schiefermuseums in Holzmaden sicher diskutieren und vielleicht weniger dramatisch, aber dafür glaubwürdiger darstellen: Dort genügt die zeitweilige Eindeichung einer Senke als Erklärung für die lokale Schieferbildung.

Dietrich Leonhardt, Ettlingen

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: 06221 9126-729

Diktat der Hormone

Spektrogramm, Januar 2004

Gehört es auch zum Balzverhalten, dass nur Leserbriefe von Männchen abgedruckt werden?

Dr. Cornelia Liesenfeld, Augsburg

Antwort der Redaktion

Selbstverständlich würden wir auch gerne Leserbriefe von Frauen abdrucken, wenn sie uns nur schrieben! Leider erhalten wir höchstens ein Prozent Briefe vom weiblichen Geschlecht.

Krank aus der Retorte

Dezember 2003

In der an sich sehr guten Zeichnung zu diesem Artikel haben die Grafiker das ganze Spermium in die Eizelle eindringen lassen, was nach meinem Wissen so nicht richtig ist. Oder gibt es da neue Erkenntnisse?

Jürgen Alberti, Bad Schönborn

Antwort der Autorin:

Nach dem derzeit geltenden Lehrbuch »Medizinische Embryologie« von Thomas W. Sadlers, 9. Aufl., verschmelzen beim Eindringen des Spermiums in die Eizelle die beiden Zellmembranen miteinander. Neben Kopf und Halsabschnitt des Spermiums dringen bei den Säugern und beim Menschen auch die fädigen Strukturen des Schwanzfadens in das Zytoplasma der Eizelle ein. Sie lösen sich später auf.

Martina Lenzen-Schulte

Rückkehr zum Mond

Februar 2004

Paul D. Spudis läßt einige Fakten außer Acht, die für ein frühes, zeitlich dann aber stetig abnehmendes Bombardement der Mondoberfläche und gegen die Theorie später »Kataklysmen« zwischen 3,8 und 3,9 Mrd. Jahren sprechen: Das sind unter anderem die datierten Impaktgesteine der Apollo-14-Region, die teilweise erheblich älter sind und damit nahe legen, dass das Großereignis, welches das (südliche) Procellarum-Becken schuf, sich mondgeschichtlich bereits sehr frühzeitig und deutlich vor dem oben genannten Intervall ereignete.

Ähnliches könnte man auf Grund des »Setting« auch für die Südpol-Aitken-Region erwarten. Bis zum Gegenbeweis



NASA

▲ Im Zentrum liegt die Südpolregion des Mondes.

wäre somit die Ableitung kraterstatistischer Methoden aus einer stetigen Impaktgeschichte des Mondes zulässig. Die von »Clementine« und »Lunar Prospector« lokalisierten Eisen- und Spurenelement-Anreicherungen in der Südpol-Aitken- und Procellarum-Region müssen nicht notwendigerweise auf überdeckte Basaltflächen hinweisen: So enthalten die Apollo-14-Proben aus der Procellarum-Region primordiale Gesteinsfragmente mit relativ hohen Spurenelement- und/oder Eisengehalten.

Auf Grund der Größe des Procellarum-Beckens kann angenommen werden, dass das Procellarum-Ereignis hier tiefere Krustenstockwerke mit abweichender Gesteinschemie freigelegt hat. Entsprechend ließe sich Vergleichbares auch für die Südpolregion des Mondes postulieren.

Dr. Stephan Lingner, Meckenheim

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Naghib, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. 0211 90833-57, Fax 0211 90833-58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Gerald Bosch, Dr. Henning Engeln, Dr. Rainer Kayser, Dr. Carola Prigge, Dr. Frank Scholz, Dr. Joachim Schüring.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Tel. 06201 6061-50, Fax 06201 6061-94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)

Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. 0211 88723-79, Fax 0211 88723-99; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 88723-76, Fax 0211 374955
Anzeigenvertretung: Berlin: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686150, Fax 030 6159005, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Detlef Cölln, Burchardstraße 17, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183/-183/ -193, Fax 040 339090; Düsseldorf: Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 301352060, Fax 0211 133974; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Klaus Haroth, Eschersheimer Landstraße 50–54, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-36, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, D-70173 Stuttgart, Tel. 0711 22475-40, Fax 0711 22475-49; München: Bernd Schwetje, Josephspitalstraße 15, D-80331 München, Tel. 089 545907-14, Fax 089 545907-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 88723-87, Fax 0211 374955

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 25 vom 01.01.2004.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President and International Manager: Dean Sanderson

SPEKTROGRAMM

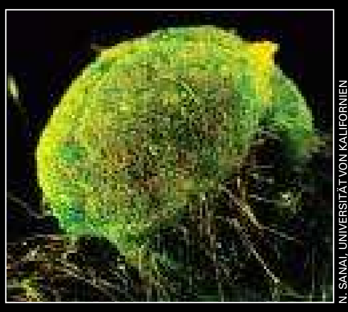
NEUROLOGIE

Zutritt verweigert

Primitive Wirbeltiere können große Teile ihres Gehirns oder Rückgrats erneuern. Bekanntes Beispiel ist der Salamander, der im Notfall seinen Schwanz abwirft und ihn nachwachsen lässt. Säugetiere haben diese Fähigkeit zur Regeneration von Neuronen des zentralen Nervensystems im Laufe der Evolution verloren. So werden beim erwachsenen Menschen zerstörte Hirnzellen nicht wieder ersetzt, während dies bei Nagetieren immerhin teilweise geschieht.

Neurologen an der Universität von Kalifornien in San Francisco sind der Frage nach dem Warum nachgegangen. Dabei fanden sie heraus, dass es im Gehirn eines Erwachsenen durchaus Regionen gibt, die neuronale Stammzellen enthalten, und dass sich diese Stammzellen *in vitro* auch in Neuronen umwandeln können. Allerdings wandern sie, wie die Forscher feststellten, nicht in andere Hirnbereiche ein, um dort abgestorbenes Nervengewebe zu ersetzen.

Daraus lässt sich folgern, dass die bestehenden Neuronen Neuankömmlingen offenbar den Zugang verweigern. Die Forscher vermuten dahinter einen biologischen Anpassungsprozess: Für das hoch entwickelte Gehirn eines Primaten ist es wichtiger, die bestehenden neuronalen Strukturen – und damit die gesammelte Lebenserfahrung – aufrechtzuerhalten, als abgestorbenes Nervengewebe zu erneuern. Die Stammzellen dienen folglich nur noch zur Regeneration der Gliazellen, welche die Neuronen umgeben. *(Nature, 19.2.2004, S. 740)*



N. SANAI, UNIVERSITÄT VON KALIFORNIEN

▲ Potenzielle Stammzellen: Diese Astrozyten aus dem Gehirn eines Patienten können sich vermehren. Der Beweis: Einige produzieren ein (rot markiertes) Protein, das typisch für sich teilende Zellen ist.

ASTROPHYSIK

Schwarzes Loch zerfetzt Stern

Bei der kleinen Gruppe der aktiven Galaxien besteht kaum ein Zweifel: Ihr enormer Energieausstoß rührt daher, dass ein extrem massereiches Schwarzes Loch in ihrem Inneren alles verschlingt, was ihm zu nahe kommt. Ob ein solcher kosmischer Moloch auch im Zentrum von normalen, harmlosen Sternsystemen sitzt, ist dagegen weniger klar.

Bei unserer heimischen Milchstraße gibt es überzeugende Hinweise darauf. Aber wie steht es mit weiter entfernten Galaxien? Zumindest bei einer davon namens RXJ1242-1119 konnten Forscher vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching nun das verborgene Monster entlarven, indem sie es beim Verschlingen eines Sterns ertappten.

Vor zwölf Jahren hatte der Satellit Rosat in der optisch unauffälligen Galaxie eine ungewöhnlich intensive Röntgenquelle entdeckt, die zwei Jahre zuvor noch nicht da gewesen war. Dieses Objekt nahmen die Garchinger Forscher nun mit den Rosat-Nachfolgern XMM-Newton und Chandra erneut ins Visier. Die Röntgenhelligkeit hat sich mittlerweile um den Faktor 200 verringert, das Nachglühen ist aber immer noch intensiver als die Emission einer normalen Galaxie bei derart kurzen Wellenlängen. Durch die hohe Winkelauflösung von Chandra ließ sich zeigen, dass die Strahlung wirklich aus dem Zentralbereich von RXJ1242-1119 kommt.

Dies und der Helligkeitsverlauf des Röntgenausbruchs sowie das Emissionsspektrum lieferten den Beweis: Ursache des Aufleuchtens war ein Stern, der in ein Schwarzes Loch fiel. Zunächst wurde er durch dessen enorme Gezeitenkräfte verformt und schließlich pulverisiert. Sein Material strömte dann in einem scheibenförmigen Wirbel nach und nach in das gefräßige Monster, wobei es sich stark erhitzte und die gemessene Röntgenstrahlung aussandte. Anhand der freigesetzten Energiemengen schätzen die Forscher, dass das Schwarze Loch im Inneren von RXJ1242-1119 rund 200 Millionen Sonnenmassen umfasst. *(The Astrophysical Journal Letters, 1.3.2004, S. L17)*



Wie ein Schwarzes Loch einen Stern zerreißt und schließlich verschlingt (Zeichnung)

NASA / CXC / MPI FÜR EXTRATERRESTRISCHE PHYSIK

NATURE, MACMILLAN PUBLISHERS LTD. / ALVAREZ-BUYLLA, QUELLE: NATURE 19. FEBRUAR 2004

▲ Die Wand des Seitenventrikels im Gehirn enthält ein Band (blau) mit Astrozyten (gelb), die als Stammzellen fungieren können, aber keine Neuronen, sondern nur das Gliagewebe regenerieren.

BIOTECHNOLOGIE

Raketentreibstoff aus Bakterien



US NAVY

▲ Würde von bakteriell produziertem Treibstoff profitieren: die Hellfire-Rakete

Seit Jahrtausenden nutzt der Mensch Mikroben zur Herstellung von Lebensmitteln wie Brot oder Wein. Nun will sich auch das Militär der kleinen Helfer bedienen, um Kriegsmaterial billiger und umweltfreundlicher zu produzieren. Finanziert von der US-Marine, hat ein Forscherteam um John Frost an der Michigan State University in East Lansing gewöhnliche Darmbakterien vom Typ *Escherichia coli* genetisch so verändert, dass sie aus Zucker Butantriol herstellen. Dieser dreiwertige Alkohol muss nur noch nitriert werden, um das brisante 1,2,4-Butantrioltrinitrat (BTTN) zu ergeben.

Die hochexplosive Flüssigkeit dient derzeit vor allem als Spezialtreibstoff für Luft-Boden-Raketen und wird chemisch produziert, was recht teuer ist. Ihre biotechnologische Herstellung wäre nicht nur energiesparender und umweltschonender, sondern würde auch die Kosten auf ein Drittel senken. Damit könnte BTTN vermehrt das billige, aber gefährlichere Nitroglyzerin ersetzen, von dem heute noch jährlich über 900 Tonnen produziert und für viele militärische, aber auch zivile Zwecke eingesetzt werden. *(Journal of the American Chemical Society, Bd. 125, S. 12998)*

MATHEMATIK

Platz sparende Smarties

Ein Topf Linsen ist gehaltvoller als dieselbe Menge Erbsen – nicht weil die Linsen einen höheren Nährwert hätten, sondern wegen ihrer flacheren Form. Dadurch bleibt zwischen ihnen, wie Wissenschaftler nun nachgewiesen haben, weniger Luft als bei den runden Erbsen.

Die Frage nach der maximalen Packungsdichte für Kugeln ist uralt. Achtlos in ein Gefäß geschüttet, nehmen sie nur rund sechzig Prozent des verfügbaren Volumens ein. Dieser Wert lässt sich durch ausdauerndes Rütteln auf 64 Prozent steigern. Die höchste Packungsdichte von 74 Prozent ergibt sich – was Kepler schon vor fast 400 Jahren vermutete, aber erst kürzlich bewiesen wurde –, wenn man die Kugeln säuberlich in einem hexagonalen Gitter stapelt, wie das manche Obsthändler mit ihren Orangen tun.

Forscher der Universität Princeton (New Jersey) haben nun die Situation für ellipsoide Körper untersucht – am Beispiel von M&Ms. Mit ihnen erreicht man, wie sich zeigte, schon bei leichtem Schütteln Packungsdichten von 72 Prozent. Anhand ausgiebiger Rechnungen fanden die Forscher auch gleich die Erklärung dafür. Demnach brauchen linsenförmige Körper mehr Nachbarn, um stabil eingebettet zu sein, sodass das Packungsgitter dichter als bei Kugeln ist. *(Science, 13.2.2004, S. 990)*

▼ M&Ms halfen, die Frage nach der Packungsdichte ellipsoider Körper zu klären.



SALVATORE TORQUATO

COMPUTERTECHNIK

Liebestest per Telefon

Er liebt mich, er liebt mich nicht … auf der Suche nach der Antwort muss künftig niemand mehr Gänseblümchen zerpflücken. Zuverlässige Auskunft gibt ein neues Computerprogramm der New Yorker Firma V Entertainment. Man braucht nur mit seiner Herzflamme zu telefonieren – anschließend weiß man, ob das hingehauchte »Ich liebe dich« ernst gemeint war oder nur vorgespielt.

Das Programm arbeitet nach dem Prinzip des Lügendetektors und analysiert die Stimme des Gesprächspartners auf Anzeichen von Stress. Denn wer ein Liebesbekenntnis abgibt, meinen zumindest die Programmentwickler, steht deutlich unter Anspannung: Er ist verlegen, sehr konzentriert und ringt nach Worten. Findet das Programm genug Stressmerkmale – also Hinweise auf echte Liebe –, dann erblüht eine Blume auf dem Bildschirm. Lässt der Gesprächspartner jedoch die gebührende innere Anteilnahme vermissen, welkt die Knospe dahin. *(abc-News Science/Technology, 13.2.2004)*



ARTHUR C. AUFDERHEIDE

▲ Auch diese 1600 Jahre alte Mumie aus Nordchile enthält bereits den Erreger der Chagas-Krankheit.

ARCHÄOLOGIE

Uralter Parasit

Nach Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation leiden etwa 12 Millionen Menschen in Mittel- und Südamerika an der unheilbaren, chronisch verlaufenden Chagas-Krankheit: einer Infektion mit dem einzelligen Parasiten *Trypanosoma cruzi*, an der etwa zehn Prozent der Betroffenen sterben. Wie nun ein Forscherteam von der Universität von Minnesota in Duluth herausfand, wütet die Seuche schon seit Jahrtausenden. Arthur Aufderheide und seine Mitarbeiter untersuchten Gewebereste von insgesamt 283 Mumien aus Nordchile und Südperu, die zwischen 450 und 9000 Jahre alt sind. In fast der Hälfte der Proben ließ sich der von Wanzen übertragene Krankheitserreger nachweisen.

Seine Häufigkeit hängt weder von Alter, Geschlecht oder Gewicht der Mumien noch von der Kulturepoche ab, aus der sie stammen. Der Parasit war also schon ein Begleiter der ersten Bewohner dieser Region. Begünstigt wird seine Verbreitung dadurch, dass die Indios in Südamerika teils bis heute noch in Stroh- oder Lehmhütten hausen – einem optimalen Lebensraum für Raubwanzen. *(PNAS, 17.2.2004, S. 2034)*





LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY

▲ Ein Kalzium-Ion kurz vor der Verschmelzung mit einem Americium-Atom (oben) und der Zerfall des neu entstandenen Elements 115 unter Abgabe von Alphateilchen (unten) in grafischer Darstellung

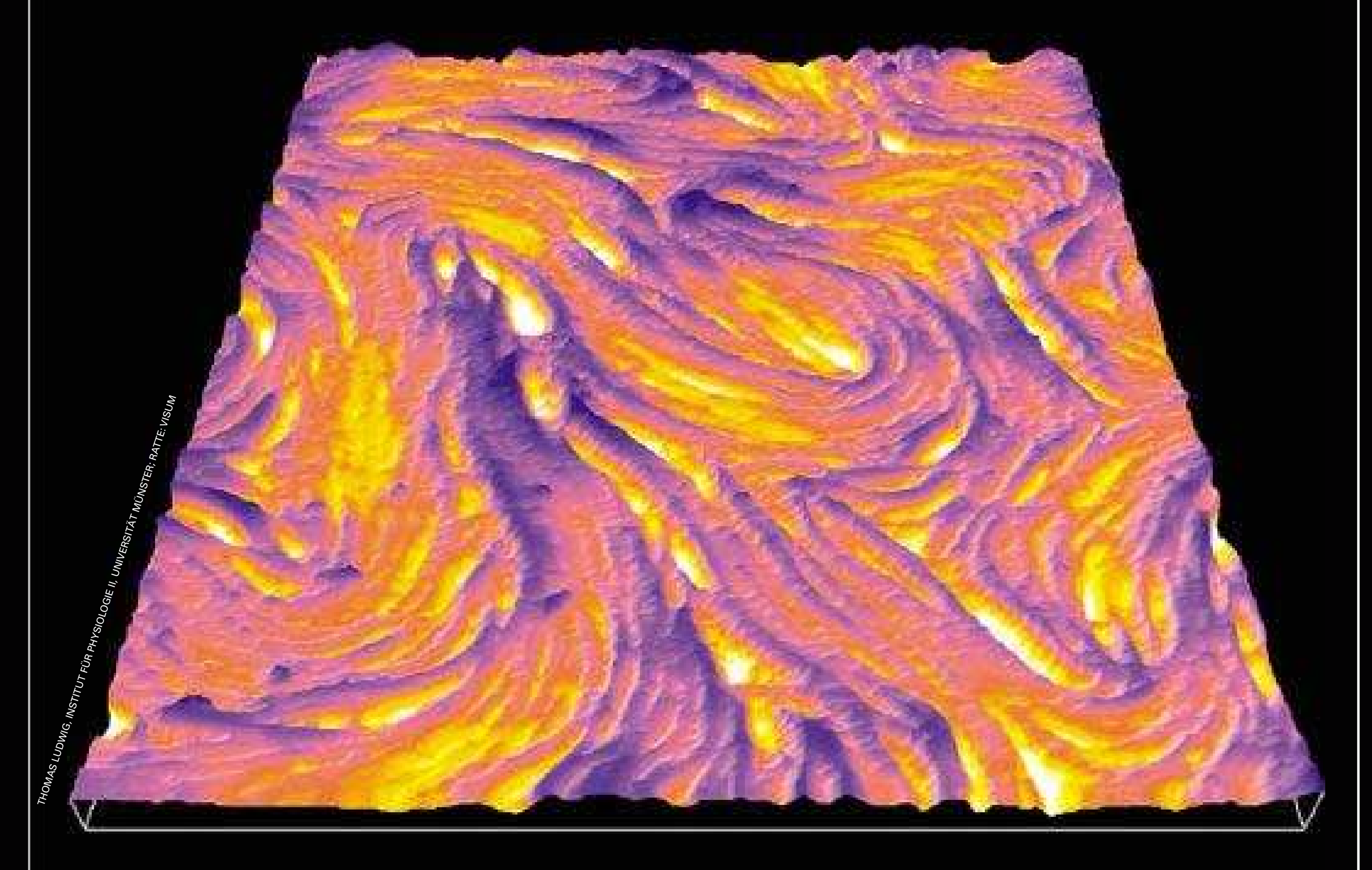
KERNPHYSIK

Element 113 und 115 erzeugt?

Unverdrossen mühen sich die Physiker um die Erweiterung des Periodensystems. Nun gab es wieder einmal eine Erfolgsmeldung. Danach sollen beim Beschuss von Americium-243 mit Ionen von Kalzium-48 kurzzeitig Kerne eines neuen Elements mit der Ordnungszahl 115 entstanden sein. Diese gingen, wie es weiter heißt, durch Aussendung eines Alphateilchens in das ebenfalls noch nicht bekannte Element 113 über. Weitere Alphazerfälle führten dann bis zum Dubnium-105, das durch eine spontane Spaltreaktion in kleinere Kerne zerfiel.

Die Fachwelt reagiert auf Meldungen dieser Art mittlerweile vorsichtig, nachdem sich die angebliche Erzeugung der Elemente 118 und 116 vor einigen Jahren als Resultat einer Datenfälschung herausgestellt hat.

Diesmal jedoch scheinen die Ergebnisse vertrauenswürdig. Sie stammen von einer Kollaboration zwischen dem Vereinigten Institut für Kernforschung in Dubna (Russland) und dem Lawrence Livermore National Laboratory (Kalifornien). Als führender Wissenschaftler firmiert der renommierte Juri Oganessian. Die amerikanischen und russischen Teams haben die Experimente in Dubna unabhängig voneinander analysiert. Laut US-Energieminister Spencer Abraham zeigt der Erfolg »den Nutzen einer uneingeschränkten internationalen wissenschaftlichen Zusammenarbeit«. Während derzeit nur das russische Zyklotron in Dubna den intensiven Kalziumstrahl erzeugen kann, haben die Amerikaner – nomen est omen – das Americium beigesteuert. *(Lawrence Livermore National Laboratory, 2.2.2004)*



THOMAS LUDWIG, INSTITUT FÜR PHYSIOLOGIE II, UNIVERSITÄT MÜNSTER; RATTE: VISUM

Rattenschwanz im Rastermikroskop

Was aussieht wie ein sich dahinwälzender Strom glutflüssiger, erstarrender Stricklava, zeigt in Wahrheit die Oberfläche eines Schnitts durch den Schwanz einer Ratte, aufgenommen mit dem Rasterkraftmikroskop und am Computer künstlich eingefärbt. Die langen, verschlungenen Wülste, deren Durchmesser nur etwa hundert Nanometer beträgt, sind Fibrillen des Bindegewebsproteins Kollagen. Es bildet nicht nur das sehnenartige Innere des Rattenschwanzes, sondern macht in Säugetieren – und damit auch im Menschen – mehr als ein Drittel der vorhandenen Eiweißmenge aus: Haut, Knorpel, Sehnen, Blutgefäße und Gelenkflüssigkeit bestehen zum großen Teil aus diesem Protein.

Grundeinheit ist ein aus drei Aminosäureketten geflochtener Strick. Einige Dutzend davon werden durch chemische Quervernetzung zu den Fibrillen verbunden, und diese lagern sich schließlich, je nach biologischer Funktion des betreffenden Gewebes, auf unterschiedliche Weise zu größeren Gebilden zusammen. Im Falle des Rattenschwanzes sind sie mäanderartig gewunden.

Das Bild stammt von Thomas Ludwig, der am Nanolab des Instituts für Physiologie II der Universität Münster über die extrazelluläre Matrix arbeitet. Es zeigt erstmals die Struktur von Kollagen unter natürlichen Bedingungen in wässriger Umgebung mit einer Auflösung im Nanometerbereich.

KLONEN

Von der Ei- zur Stammzelle und zurück

Erstmals ließen sich Stammzellen aus geklonten menschlichen Embryonen gewinnen – ein Meilenstein auf dem Weg zu körpereigenem Ersatzgewebe. Seine Bedeutung steigt noch durch Erfolge beim umgekehrten Vorgang: der Schaffung von Keimzellen aus Stammzellen.

Von Michael Groß

Ob es den Raelianern vor einem Jahr wirklich gelungen ist, einen Menschen zu klonen, darf bezweifelt werden. Dass es jedoch grundsätzlich möglich wäre, zeigt jetzt ein mit dem Gütesiegel kompetenter Gutachter versehener Fachbericht aus Südkorea – auch wenn es dabei »nur« um das nahe verwandte, aber weniger anstößige Ziel des therapeutischen Klonens geht.

Dem erfolgreichen Forscherteam unter Leitung des Klon-Experten Woo Suk Hwang und des Gynäkologen Shin Yong Moon von der Nationaluniversität in Seoul kam zugute, dass es über 242 menschliche Eizellen (Oozyten) verfügte, alle ausdrücklich für den Zweck dieses Experiments gespendet. Dank dieser geradezu riesigen Anzahl konnte es seine Vorgehensweise systematisch abwandeln und optimieren.

Der erste wichtige Unterschied zu anderen Klonversuchen lag in der Methode, mit der die Koreaner aus 176 ausgewählten Eizellen deren eigene DNA entfernten. In der Regel geschieht das durch Absaugen mit einer Spritze, was die Oozyte jedoch möglicherweise schädigt. In Seoul bevorzugte man deshalb eine neuere Methode. Dabei pieksten die Forscher ein deutlich kleineres Loch in die Zona pellucida oder Glashaut – die besondere Schutzhülle der Oozyten von Säugetieren – und drückten die DNA, die im Endstadium der letzten Reifeteilung als Doppelspindel am Zellrand vorliegt, ganz sanft wie einen Pickel aus.

Als Lieferanten der dafür einzusetzenden neuen Erbsubstanz verwendeten Hwang und seine Mitarbeiter ausdifferenzierte Zellen derselben Spenderin: so genannte Cumulus-Zellen, welche an der reifenden Eizelle haften. Ob diese Wahl die Erfolgsaussichten verbesserte, ist allerdings unklar. Sie mag auch bioethische Gründe gehabt haben, weil sie die Experimente von Versuchen zum reproduktiven Klonen abgrenzte, bei denen die Eizelle und die übertragene DNA normalerweise von verschiedenen Personen stammen würden.

Andererseits hatte sie einen entscheidenden Nachteil: Sie ließ zumindest theoretisch die Möglichkeit offen, dass die erzeugten Embryonen aus einer spontanen Teilung der unbefruchteten Eizelle hervorgingen – ein als Jungfernzeugung oder Parthenogenese bezeichneter Vorgang. Deshalb mussten die Forscher einigen Aufwand betreiben, um diese Möglichkeit weitestgehend auszuschließen. Dazu wiesen sie unter anderem nach, dass sie die eigene DNA der Eizelle vollständig entfernt hatten.

Ein weiterer bedeutsamer Faktor war offenbar die Zeitspanne zwischen der elektrisch ausgelösten Fusion der entkernten Oozyte mit der DNA-spendenden Zelle und dem chemisch ausgelösten Beginn der Embryonalentwicklung. Diese Wartezeit spielt eine wichtige Rolle. Sie verschafft der Eizelle nämlich Gelegenheit zu einem unerlässlichen Revirement. Dabei wird die Erbsubstanz der ausdifferenzierten Zelle mit ihrem hochspezialisierten Muster aus an- und abgeschalteten Genen auf die Erfordernisse der frühen Entwicklung umprogrammiert, in der andere Gene aktiv sein müssen. Durch Ausprobieren fanden die Forscher heraus, dass beim Menschen die bei Schweinen etablierte Methode, die Zellteilung sofort anzuregen, nicht funktioniert. Als ideal erwies sich eine Wartezeit von zwei Stunden, wie sie auch bei Rindern gebräuchlich ist.

Beachtliche Ausbeute an Klon-Embryonen

Mit dieser Vorgehensweise erreichten Hwang und seine Mitarbeiter eine ansehnliche Ausbeute: Etwa ein Viertel der geklonten Eizellen schaffte den Aufbruch in die Embryonalentwicklung bis hin zum Stadium der aus einigen hundert Zellen bestehenden Blastozysten. Diese Quote entspricht in etwa derjenigen bei Rindern und Schweinen.

Theoretisch hätten die Koreaner diese Blastozysten Leihmüttern einpflanzen können und – dank der großen Zahl – wahrscheinlich zumindest ein Klonbaby erhalten. An dieser Möglichkeit waren sie allerdings nicht interessiert. Statt des reproduktiven Klonens hatten sie die

Ein geklonter menschlicher Embryo im Zwei-, Vier- und Achtzellstadium





W. S. HWANG

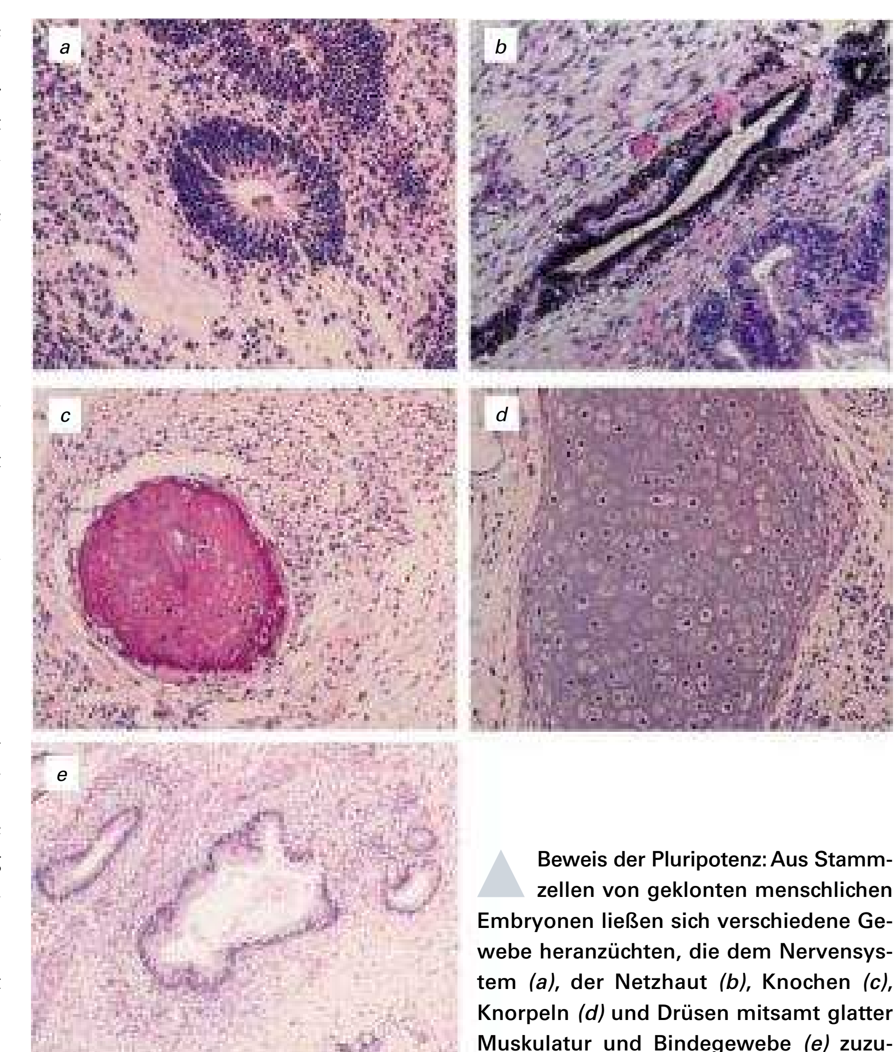
therapeutische Variante im Sinn: Sie wollten embryonale Stammzellen gewinnen – jene neuen Hoffnungsträger der Medizin, über deren Erzeugung, Import und Verwendung in den vergangenen Jahren in Deutschland so heftig diskutiert wurde. Aus ihnen lassen sich die verschiedensten Zelltypen gewinnen, wenn man ihre Ausdifferenzierung entsprechend anregt; deshalb werden sie als pluripotent (»zu vielem fähig«) bezeichnet. Das therapeutische Klonen verheißt, auf diesem Wege Ersatzgewebe mit dem identischen Erbgut des Patienten zu erzeugen, das nach der Implantation nicht abgestoßen würde.

Hwang und seine Kollegen entnahmen also zwanzig geklonten Blastozysten nach dem üblichen Verfahren den so genannten Embryonalknoten und kultivierten ihn. Letztendlich erhielten sie so eine einzige Stammzelllinie. An ihr prüften sie mit einer Vielzahl von Experimenten, ob sie tatsächlich pluripotent und genetisch mit der Spenderzelle identisch ist. Die Zelllinie bestand all diese Tests, sodass nur die verschwindend geringe Wahrscheinlichkeit der Jungfernzeugung als möglicher Zweifel übrig bleibt. Um ihn völlig auszuräumen, müsste man zeigen, dass das Verfahren auch dann funktioniert, wenn Eizelle und DNA nicht von derselben Person stammen.

Trotz dieses sensationellen Erfolgs erscheint der Weg zum Fernziel des therapeutischen Klonens allerdings noch lang. Viele Fragen bleiben zu klären – zum Beispiel die, ob die geklonten Stammzellen tatsächlich Ersatzgewebe hervorbringen können, das sich für die Transplantation eignet. Vor allem aber wird man eine von Spenderinnen unabhängige Quelle für menschliche Eizellen finden müssen.

Einen viel versprechenden Ansatz dazu gibt es allerdings bereits. Das zeigen jüngste Forschungsarbeiten, die sozusagen das umgekehrte Ziel verfolgten wie das südkoreanische Team: die Erzeugung von Gameten – Eizellen oder Spermien – aus embryonalen Stammzellen. Viele Forscher hielten dies bis vor kurzem für unmöglich; das ist auch einer der Gründe, warum man Stammzellen nur als pluri- und nicht totipotent (»zu allem fähig«) bezeichnet.

Doch einige Experten waren anderer Meinung. Die frühesten Entwicklungsstufen von der befruchteten Eizelle zum Fetus liegen beim Säugetier und insbesondere beim Menschen zwar noch weit gehend im Dunkeln. Eines steht aber fest: Zumindest einige Zellen in der Blastozyste gehen nicht den Weg der anderen, die sich allmählich zu den verschiedenen Körpergeweben differenzieren, sondern bewahren ihre Totipotenz mit der Option auf Unsterblichkeit, indem sie zu Keimbahnzellen werden: den Vorläufern von Gameten, aus denen bei der sexuellen Fortpflanzung dann ein neuer Organismus entstehen kann. Unklar ist nur, welche Zellen diesen Sonderweg einschlagen und warum.



Beweis der Pluripotenz: Aus Stammzellen von geklonten menschlichen Embryonen ließen sich verschiedene Gewebe heranzüchten, die dem Nervensystem *(a)*, der Netzhaut *(b)*, Knochen *(c)*, Knorpeln *(d)* und Drüsen mitsamt glatter Muskulatur und Bindegewebe *(e)* zuzuordnen sind.

Zellen, die sich nicht festlegen

Aus diesem Grunde hielt es Hans Schöler, damals noch an der Universität von Pennsylvania in Philadelphia, für durchaus denkbar, dass sich auch unter den embryonalen Stammzellen im Reagenzglas einige befinden, die sich noch alle Optionen offen halten und somit auch im Stande sein sollten, sich zu Keimbahnzellen zu entwickeln. Vielleicht habe die Forschung, so seine Überlegung, nur noch nicht herausgefunden, wie man diese Zellen erkennen und darin bestärken kann, den Weg zur Oozyte oder zum Spermium einzuschlagen.

Das Team von Schöler, der inzwischen Direktor am Max-Planck-Institut für vaskuläre Biologie in Münster ist, untersuchte diese Möglichkeit bei der Maus und hatte Erfolg. Wie die Wissenschaftler schon Ende Mai vorigen Jahres berichteten, konnten sie tatsächlich aus embryonalen Stammzellen Eizellen gewinnen *(Science, Bd. 300, S. 1251)*. Diese hatten nicht nur die richtige Größe und äußere Erscheinungsform, sondern waren auch von der typischen Glashaut umhüllt. Außerdem deuteten das Muster ihrer Gen-Aktivität, die Bildung so genannter Polkörperchen und andere Anzeichen darauf hin, dass sie – genau wie ihre natürlichen Gegenstücke im Eier- ▷

KOMMENTAR

Ich, Klon

Die »Drei Gesetze des Klonens« können irrationale Ängste abbauen und die Freiheit der Forschung bewahren helfen.

Isaac Asimov präsentierte in seinem 1950 veröffentlichten Roman »Ich, Roboter« die Drei Gesetze der Robotik: »1. Ein Roboter darf kein menschliches Wesen verletzen oder zulassen, dass einem menschlichen Wesen ein Leid geschieht. 2. Ein Roboter muss die Befehle menschlicher Wesen befolgen, außer wenn diese nicht mit dem Ersten Gesetz vereinbar sind. 3. Ein Roboter muss sich selbst schützen, sofern er damit nicht das Erste oder Zweite Gesetz verletzt.«

Die irrationalen Befürchtungen, welche die Idee des Klonens bei vielen Menschen weckt, gleichen denen, die vor einem halben Jahrhundert gegenüber Robotern bestanden. Deshalb möchte ich analog zu Asimov an dieser Stelle Drei Gesetze des Klonens vorschlagen, die zugleich mit drei Missverständnissen aufräumen: 1. Ein menschlicher Klon ist ein menschliches Wesen mit ebenso einzigartiger Persönlichkeit wie ein eineiiger Zwilling. 2. Ein menschlicher Klon hat alle Rechte und Ansprüche, die seinem legalen und moralischen Status zukommen. 3. Ein menschlicher Klon besitzt die gleiche Würde und verdient denselben Respekt wie jedes menschliche Wesen.

Das ethische Problem ist sicher vielschichtig, und diese Aussagen mögen einigen als zu grobe Vereinfachung erscheinen, welche der komplexen Thematik nicht gerecht wird. Dennoch helfen sie, ein wenig Klarheit in die von sophistischen Nebelkerzen und rhetorischem Bombast umwölkte Debatte zu bringen. Nachdem südkoreanische Forscher jetzt die prinzipielle Machbarkeit des therapeutischen Klonens demonstriert haben, steht fest, dass irgendwer irgendwo irgendwann in naher Zukunft einen menschlichen Klon erzeugen wird. Sobald aber ein Team Erfolg hatte, stößt es die Tür auf für andere, und es gibt kein Halten mehr.

Wenn das Klonen abnorme Menschen hervorbringt, disqualifiziert es sich von selbst. Dann braucht man es als weitere Methode, unfruchtbaren Paaren zu Kindern zu verhelfen, nicht zu verbieten, weil ohnehin niemand Interesse daran hat. Wenn es aber funktioniert, gibt es keinen Grund, es zu verbieten; denn die drei Hauptargumente, die für Beschränkungen ins Feld geführt werden, erweisen sich bei genauer Betrachtung als Mythen. Ich nenne sie den Mythos der identischen Persönlichkeit, den Mythos des Gottspielens und den Mythos der verletzten Menschenwürde.

Als Beispiel für den Mythos der identischen Persönlichkeit kann die Aussage von Umweltaktivist Jeremy Rifkin gelten: »Es ist ein furchtbares Verbrechen, die Kopie von jemandem zu erzeugen. Man steckt einen Menschen in eine genetische Zwangsjacke.« *Papperlapapp*. Wer so großen Wert auf die Umwelt legt wie Rifkin und seine Gesinnungsgenossen, sollte genau andersherum argumentieren: »Klont, so viel ihr wollt – ihr werdet doch kein zweites Ich erschaffen, weil die Umwelt genauso viel zählt wie das genetische Erbe.« Nach allem, was heute an wissenschaftlichen Erkenntnissen vorliegt, lässt sich etwa die Hälfte dessen, was unsere Persönlichkeit ausmacht, den Genen und die andere Hälfte der Umwelt zuschreiben. Es ist unmöglich, die Unzahl von Umwelteinflüssen während der Entwicklung eines Individuums zu reproduzieren. Damit droht der Einzigartigkeit der menschlichen Persönlichkeit vom Klonen keine Gefahr.

AG. FOCUS / SPL

Der Mythos des Gottspielens hat viele Anhänger, darunter Stanley M. Hauerwas, Professor für religiöse Ethik an der Duke-Universität in Durham (North Carolina). »Schon der Versuch, einen Menschen zu klonen, ist ein Frevel. Die Vorstellung, wir müssten alles tun, was wir können, entspringt dem vermessenen prometheischen Verlangen, unsere eigenen Schöpfer zu sein.« Mit dieser Ansicht ist Hauerwas nicht allein. Bei einer Umfrage von Time und CNN im Jahre 1997 antworteten 74 Prozent von 1005 Amerikanern mit »Ja« auf die Frage: »Widerspricht es Gottes Willen, Menschen zu klonen?« *Quatsch*. Klonen sieht nur deswegen nach Gottspielen aus, weil es neu ist. Auch früher wurden viele Methoden zur künstlichen Fortpflanzung als gottähnlich verdammt, die uns nun selbstverständlich sind, weil wir uns daran gewöhnt haben. Man denke nur an die Reagenzglasbefruchtung oder den Embryotransfer.

Der Mythos der verletzten Menschenwürde schließlich findet sich in der offiziellen Stellungnahme der katholischen Kirche zum Klonen, niedergelegt in der päpstlichen Enzyklika »Donum vitae« von 1987. Danach widerspricht das Verfahren »sowohl der Würde der menschlichen Fortpflanzung als auch derjenigen der ehelichen Vereinigung«. In dieselbe Richtung geht die Forderung eines angesehenen islamischen Geistlichen, dass »die Wissenschaft von strikten Gesetzen reguliert werden muss, um die Menschheit und ihre Würde zu schützen«. *Humbug*. Klone sind sich nicht ähnlicher als getrennt aufgewachsene eineiige Zwillinge, und niemand käme auf die Idee, Zwillingen die Menschenwürde oder gar das Existenzrecht abzusprechen.

Statt dem Fortschritt der Wissenschaft Grenzen setzen oder ihn gar verhindern zu wollen, sollten wir lieber die genannten Drei Gesetze des Klonens akzeptieren. Ohnehin entsprechen sie Geist und Buchstaben der amerikanischen Verfassung und der Grundgesetze aller freien Nationen. Das Wesen der Wissenschaft liegt im kühnen Denken und kreativen Experimentieren, nicht in ängstlicher Beschränkung und in Verboten. Erkenntnisfortschritt lässt sich nicht verhindern. Damit die Wissenschaft vorankommt, muss sie die Möglichkeit erhalten, zu prüfen, ob eine Idee erfolgreich ist oder scheitert. Machen wir also das Klon-Experiment und sehen, was passiert.

Michael Shermer

Der Autor ist Verleger des Magazins »Skeptic« und Kolumnist bei »Scientific American«.

▷ stock – die erste Phase der Reifeteilung (Meiose) durchmachten oder schon abgeschlossen hatten. Zwar prüften Schöler und seine Mitarbeiter nicht, ob sich ihre Eizellen mit Spermien normal befruchten ließen, allerdings beobachteten sie, dass sich einige von ihnen offenbar durch Parthenogenese zu Embryonen entwickelten. Interessanterweise entstanden auch aus Stammzellen mit männlichem Genom ausschließlich Oozyten und keine Spermien.

Spermien aus Stammzellen

Den Trick, männliche Keimzellen zu produzieren, fanden wenig später unabhängig voneinander zwei Gruppen in Tokio und Massachusetts, die ihre Ergebnisse um die Jahreswende kurz hintereinander publizierten. Zunächst vermeldete das japanische Team um Toshiaki Noce am Mitsubishi-Kagaku-Institut für Biologie die erfolgreiche Gewinnung von Spermien aus Mäuse-Stammzellen *(Proceedings of the National Academy of Sciences, Bd. 100, S. 11457)*. In der zweiten Veröffentlichung lieferten George Q. Daley von der Harvard-Universität und seine Mitarbeiter zusätzlich den Beweis, dass derart erzeugte Spermien fähig sind, eine normale Eizelle zu befruchten und die ersten Stadien der Embryonalentwicklung auszulösen *(Nature, Bd. 427, S. 148)*. Dazu muss man sie allerdings in die Oozyte injizieren, da sie nicht über eine Geißel zur Fortbewegung verfügen.

Alle drei Arbeitsgruppen hatten in die Stammzellen einen genetischen Marker eingeschleust, mit dem sich die Entwicklung zu Keimbahnzellen frühzeitig erkennen ließ. Die so identifizierten Keimbahnkandidaten konnten dann isoliert und unter Kulturbedingungen vermehrt werden, die das Voranschreiten auf dem eingeschlagenen Weg förderten. Welche Bedingungen diesem Zweck am besten dienten, mussten die Forscher allerdings durch Probieren herausfinden – oder durch geschicktes Raten.

Dabei hatten Japaner und Amerikaner dieselbe Idee. Sie griffen auf so genannte Embryoidkörper zurück: rundliche, teilweise differenzierte Zellklumpen, die manchmal spontan aus embryonalen Stammzellen entstehen und in vieler Hinsicht einem frühen Embryo ähneln. Da sie im Laborversuch die Entstehung von Blutzellen fördern und die ersten Blutgefäße des Embryos aus derselben Region hervorgehen wie die Keimbahnzellen, könnten sie auch, wie beide Forschungsteams hofften, die Entwicklung von Ei- oder Samenzellen fördern.

Diese Vermutung erwies sich als Volltreffer. Zugleich hatte die Methode einen unerwarteten, aber sehr willkommenen Nebeneffekt: Stammzellen mit männlichem Chromosomensatz bildeten bei dieser Behandlung männliche Keimbahnzellen, während ohne Embryoidkörper – wie Schölers Team festgestellt hatte – grundsätzlich Eizellen entstehen.

Zusammen mit den Ergebnissen der südkoreanischen Forscher bieten diese Befunde nun weit reichende Perspektiven. Theoretisch eröffnen sie völlig unfruchtbaren Menschen, die sich bisher klonen lassen müssten, um überhaupt genetisch verwandte Nachkommen zu haben – was jedoch gesellschaftlich geächtet und fast überall auf der Welt verboten ist – einen Weg zu »normalen« Kindern. Durch therapeutisches Klonen ließen sich zunächst embryonale Stammzellen und daraus dann Gameten gewinnen, die schließlich für eine übliche Reagenzglasbefruchtung dienen könnten. Die so entstandenen Nachkommen wären genetisch nicht von normalen Kindern zu unterscheiden. Allerdings fehlt bis dahin noch ein großer Schritt: Es müsste erst gelingen, die Mäuse-Ergebnisse mit menschlichen Stammzellen zu reproduzieren.

Auch in diesem Fall dürfte die Fortpflanzung im Endeffekt allerdings höchstens eine marginale Rolle spielen. Ein viel wichtigerer Nutzen ist die Aussicht, dass man dann in einem geschlossenen Kreislauf Ei- und Stammzellen für die Forschung und möglicherweise für das therapeutische Klonen erzeugen kann, ohne auf Spenderinnen oder übrig gebliebene Embryonen von Reagenzglasbefruchtungen zurückgreifen zu müssen. Für die Medizin wäre das ein Riesenfortschritt und für viele Schwerkranke, die dringend Ersatzorgane benötigen, ein großer Segen. Generell bleibt allerdings festzustellen, dass die jetzigen Ergebnisse nur die prinzipielle Machbarkeit unter Beweis gestellt haben. Bis zu einer eventuellen praktischen Umsetzung ist es noch ein weiter Weg, von dem nicht einmal feststeht, ob er sich überhaupt als gangbar erweisen wird. ◁

Michael Groß ist promovierter Biochemiker, freier Wissenschaftsjournalist und »Science Writer in Residence« am Birkbeck College in London.

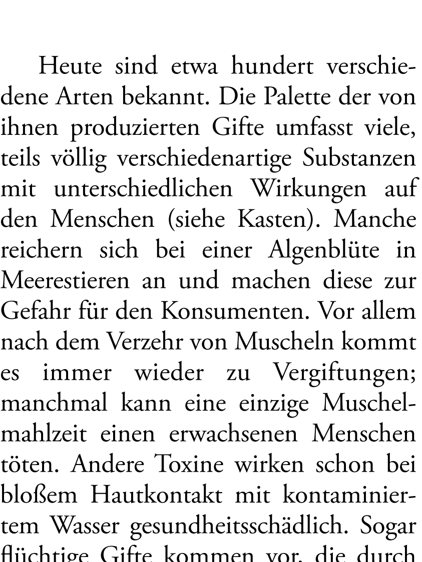
Biosensor für Giftalgen

Immer wieder kommt es in Küstengewässern zur explosionsartigen Vermehrung Gift produzierender Einzeller. Ein neu entwickelter Sensor erleichtert ihren Nachweis.

Von Frank Schubert

Äußerlich wirkt er nicht spektakulärer als ein Spannungsprüfer aus dem Elektroladen. Doch seine inneren Werte machen ihn einzigartig. Der kleine, unscheinbare Kasten ist der weltweit erste Biosensor, mit dem sich Giftalgen schnell, sicher und vergleichsweise kostengünstig nachweisen lassen. Ein Prototyp wird derzeit erprobt.

Als Giftalgen bezeichnet man gewöhnlich Photosynthese treibende einzellige Meeresorganismen (Mikroalgen und Cyanobakterien), die unter bestimmten Umständen massenhaft auftreten und dabei erhebliche Mengen an toxischen Substanzen absondern.



Heute sind etwa hundert verschiedene Arten bekannt. Die Palette der von ihnen produzierten Gifte umfasst viele, teils völlig verschiedenartige Substanzen mit unterschiedlichen Wirkungen auf den Menschen (siehe Kasten). Manche reichern sich bei einer Algenblüte in Meerestieren an und machen diese zur Gefahr für den Konsumenten. Vor allem nach dem Verzehr von Muscheln kommt es immer wieder zu Vergiftungen; manchmal kann eine einzige Muschelmahlzeit einen erwachsenen Menschen töten. Andere Toxine wirken schon bei bloßem Hautkontakt mit kontaminiertem Wasser gesundheitsschädlich. Sogar flüchtige Gifte kommen vor, die durch Einatmen in den Körper gelangen.



MALTE ELBRÄCTER, DZMB, FORSCHUNGSINSTITUT SENCKENBERG

Der begeißelte Einzeller *Alexandrium tamarense* gehört zu den Giftalgen, die sich im Meer massenhaft vermehren können.

In jüngster Zeit häufen sich Beobachtungen so genannter toxischer Algenblüten in küstennahen Gewässern (siehe Spektrum der Wissenschaft 10/1994, S. 70, und 1/2000, S. 66). Die Gründe dafür sind noch nicht vollständig geklärt. Eine wichtige Rolle spielen aber offenbar Nährstoffe, die durch menschliche Aktivitäten über die Flüsse ins Meer gelangen – zum Beispiel in Form von Düngemitteln, Abwässern oder Gülle.

An der Atlantikküste der Vereinigten Staaten treten inzwischen fast jedes Jahr toxische Algenblüten auf – mit teils katastrophalen Folgen: Das von den Einzellern produzierte Gift tötet Fische, fischfressende Vögel und sogar Wale in großer Zahl. Dieses Massensterben verursacht Millionenschäden in der Fischerei-Industrie, aber auch in der Tourismusbranche; denn oft werden Unmengen von Tierkadavern an die Strände gespült. Besonders betroffen sind Fisch- und Muschelfarmen, weil die dort gezüchteten Tiere einer Algenblüte nicht ausweichen können. Ein zuverlässiges und schnelles Frühwarnsystem wäre also ein Segen für Umweltbehörden, Fischereibetriebe, Fischfarmen und die Tourismusbranche gleichermaßen.

Der neue Biosensor ist ein bedeutender Schritt auf dem Weg dahin. Mit minimalem Aufwand kann er die zu den Giftalgen zählenden Dinoflagellaten *Alexandrium tamarense* (Bild) und *A. ostenfeldii* aufspüren: kleine Einzeller, die sich ▷

Die Wirkungen der Algengifte

Derzeit unterscheidet man bei Vergiftungen mit Algentoxinen fünf verschiedene Krankheitsbilder.

Amnestische Muschelvergiftungen, verursacht durch Domoinsäure. Sie können lebensgefährlich sein. Symptome sind Erbrechen, Bauchkrämpfe und Durchfall, weiterhin Kopfschmerzen, Orientierungs- und Gedächtnisverlust sowie Atembeschwerden bis hin zum Koma. Einzellige Rot- und Kieselalgen, die das Toxin produzieren, werden von Muscheln aufgenommen.

Ciguatera-Vergiftungen, verursacht durch Ciguatoxin oder Maitotoxin. Die beiden Gifte wirken auf die Natriumkanäle in Nervenzellen und führen zu Erbrechen, Durchfall, gestörter Temperaturwahrnehmung und Muskelschmerzen; Mund und Finger fühlen sich taub an und kribbeln. Die Toxine werden von Dinoflagellaten – bestimmten Geißeltierchen – produziert und gelangen über die Nahrungskette in Riff-Fische.

Diarrhöische Muschelvergiftungen, verursacht durch Okadasäure. Das gleichfalls von Dinoflagellaten hergestellte Gift führt zu Übelkeit, Erbrechen und Schüttelfrost.

Neurotoxische Muschelvergiftungen, verursacht durch Brevetoxine, die mit Ciguatoxin verwandt sind. Sie wirken ebenfalls auf die Natriumkanäle und bewirken zunächst Durchfall, Erbrechen und Bauchschmerzen, später Schwindel, Muskelschmerzen, Angstzustände und Kribbeln in den Gliedmaßen. Die Toxine, die von dem Dinoflagellaten *Ptychodiscus brevis* produziert werden, können Aerosole bilden und Atembeschwerden verursachen.

Paralytische Muschelvergiftungen, verursacht durch Saxitoxine, die unter anderem von Dinoflagellaten der Gattung *Alexandrium* produziert werden. Sie erzeugen Benommenheit, Schwindelgefühl und Fieber. In schweren Fällen setzen Atmung und Puls aus. Dann droht Lebensgefahr.



JÖRN THIERMANN



Sensorstreifen mit aufgebrachten DNA-Chips fischen aus der Probelösung charakteristische Stücke des Genoms von Giftalgen, deren Konzentration das tragbare Auswertegerät (links) misst.

▷ mit langen Geißeln fortbewegen. Beide produzieren Saxitoxine: Nervengifte, die Benommenheit, Schwindelgefühle und Fieber verursachen; in schweren Fällen können sie sogar zu Atem- und Herzstillstand führen.

Entwickelt wurde der Sensor im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts, an dem die Universitäten Jena, Stuttgart und Mainz, das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven und das Forschungsinstitut Senckenberg in Frankfurt beteiligt waren. Er weist die toxischen Algen anhand ihres genetischen »Fingerabdrucks« nach. Dazu muss man sie zunächst aufbrechen, um die enthaltenen Nucleinsäuren mit den Erbinformationen freizusetzen. Dann fügt man ein künstlich hergestelltes kurzes DNA-Stück hinzu, dessen Basenfolge komplementär zu einem Abschnitt auf einem charakteristischen RNA-Molekül der Algen ist. Die Sonde heftet sich deshalb hochspezifisch nur an die Algen-RNA – sie hybridisiert mit ihr, wie Biologen sagen.

Die Mixtur wird nun auf Einweg-Chips getropft, auf deren Oberfläche ein zweites kurzes DNA-Molekül fest verankert ist. Dessen Basensequenz passt zu einem anderen Abschnitt auf der Algen-RNA. Deshalb fischt die zweite Sonde den Verbund aus Algen-RNA und erster Sonde aus der Mixtur heraus und hält ihn auf dem Chip fest. Ein tragbares Auswertegerät, in das man die Chips schiebt, misst dann innerhalb kurzer Zeit die Anzahl der festgehaltenen RNA-DNA-Hybride. Daraus lässt sich auf die Konzentration der giftigen Algen in der Wasserprobe rückschließen.

Damit die Messung schnell und automatisch erfolgen kann, trägt die erste DNA-Sonde zusätzlich einen immunologischen Marker. Daran heftet sich spezifisch ein Antikörpermolekül, an das ein Enzym gekoppelt ist. Dieses Enzym katalysiert eine chemische Reaktion, die eine elektrische Spannung erzeugt. Das Auswertegerät misst diese Spannung. Je höher sie ist, desto mehr Enzym befindet sich auf dem Chip und desto mehr Algen-RNA war in der untersuchten Wasserprobe enthalten.

Noch spricht der Biosensor auf nur zwei der etwa hundert bekannten Giftalgenarten an. Doch Wissenschaftler am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung sind schon dabei, sein Nachweisspektrum zu erweitern. Sofern der Sensor eines Tages alle wichtigen toxischen Algenarten erfasst, könnte er zur Standardausrüstung eines jeden Fischers avancieren. ◁

Frank Schubert ist promovierter Biophysiker und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

AM RANDE

Die bleifreie Kanone

Das US-Militär arbeitet – so hieß es unlängst in »Nature« *(Bd. 427, S. 580)* – an der Entwicklung von umweltfreundlichen Explosivstoffen für Geschütze und Handfeuerwaffen. Auch deutsche Forscher suchen nach »grüner Munition«.

»Wie bitte?«, denkt der Leser verdutzt. »Lässt sich ein Ökosystem schonen, wenn es bombardiert und beschossen wird?« Zugegeben, die Umwelt am Kriegsschauplatz selbst kümmert die Militärs herzlich wenig. Sorgen macht ihnen jedoch die enorme Schwermetallbelastung daheim – auf Trainingsgeländen, Schießplätzen und in Manövergebieten.

Derzeit verwendete Explosivstoffe enthalten Blei, hauptsächlich in Form von Bleiazid und Bleistyphnat. Das Schwermetall wird bei jedem Schuss in die Umgebung verteilt – mit üblen Folgen für das betreuende Personal und die auszubildenden Soldaten. So hatten FBI-Angestellte, die einen Schießplatz säuberten, laut »Nature« Bleiwerte im Blut, welche die gesundheitlich tolerierbare Obergrenze um das Zehnfache überschritten.

Ein handfestes Entsorgungsproblem kommt hinzu: Tausende Tonnen von bleihaltiger Munition haben ihr Haltbarkeitsdatum überschritten, können nicht mehr »verbraucht« werden und lagern als Sondermüll in Depots. Es ist also durchaus folgerichtig, dass das Militär nunmehr nach alternativen Sprengstoffen sucht. Dabei experimentiert es zum Beispiel mit einem Gemisch aus Aluminium-Nanopartikeln, Acetylenruß (einer graphitähnlichen Substanz) und Molybdäntrioxid.

Doch die Vorstellung, dass sich moderne Krieger demnächst rühmen, ihre Tod und Verstümmelung bringenden Geschosse ausschließlich mit bleifreiem Pulver zu verschießen, erscheint schon ziemlich skurril. Fehlt nur noch der Umweltengel auf der Patronenhülse.

Frank Schubert

ELEKTRONIK

Videos vom Papier

Eine flexible Folie mit Bildpunkten, deren Helligkeit sich innerhalb von Millisekunden elektronisch verändern lässt, könnte der Vorbote einer neuen Medienlandschaft sein.

Von Stefan Maier

Überfüllte U-Bahn am frühen Morgen, noch schnell ein Blick in die aktuellen Nachrichten auf dem Weg zur Arbeit. Ein Griff in die Jackentasche, die Papierrolle ausgefaltet, ein kurzes Überfliegen der Hauptartikel. Beim Berühren eines Sensorfeldes erwachen die Bilder zum Leben und verwandeln sich in Videosequenzen. Dann den Daumen auf ein anderes Feld gedrückt, und die nächste Seite erscheint wie von Geisterhand auf der Rolle.

Zukunftsvision oder Utopie? Forscher in aller Welt arbeiten jedenfalls mit Hochdruck an der Verwirklichung dieses Traums. Die größte Hürde ist die Entwicklung eines »elektronischen Papiers«: einer kontraststarken, dünnen, elastischen Folie, die Texte, Bilder und Videos darstellen kann. Damit der Stromverbrauch gering bleibt – wichtig für den mobilen Einsatz –, sollte die Anzeige zudem ohne aktive Leuchtelemente auskommen und nur auf der natürlichen Reflexion von Licht beruhen. Doch der Blick auf das Flüssigkristalldisplay einer Armbanduhr entmutigt da bisher selbst eingefleischte Enthusiasten – kaum Kontrast, und wehe, man will die Ziffern unter einem flachen Winkel betrachten. Allein der Gedanke, ganze Seiten voller Text von derartigen Reflexionsbildschirmen ablesen zu müssen, verursacht bereits Kopfschmerzen.

Deshalb suchen Robert A. Hayes und B. Johan Feenstra von den Forschungslaboratorien der Firma Philips in Eindhoven schon seit mehreren Jahren nach einer Alternative. Und jetzt glauben sie endlich den Durchbruch geschafft zu haben. In der Fachzeitschrift »Nature« *(Bd. 425, S. 383)* präsentieren sie den einfachen Prototyp eines dünnen Kunststoffbildschirms, der herkömmlichen Druckmedien in der Kontraststärke kaum nachsteht und zudem bewegte Bilder mit der Zeitauflösung von Videos abspielen kann.

Gemessen an seinen Fähigkeiten ist das neue elektronische Papier überraschend einfach aufgebaut. Es besteht aus einer weißen Kunststofffolie mit einem Gitter aus kleinen Einbuchtungen, die als Bildpunkte oder fachsprachlich Pixel dienen. Sie sind jeweils mit einem dunklen Öltropfen gefüllt und erscheinen so als winzige schwarze Flecken.

Öltropfen schrumpfen, wie von Geisterhand bewegt

Um einen solchen Bildpunkt aufzuhellen, muss man nur eine elektrische Spannung anlegen. Je nach deren Stärke beginnt sich der Tropfen dann wie von Geisterhand mehr oder weniger stark zusammenzuziehen, sodass der weiße Hintergrund sichtbar wird.

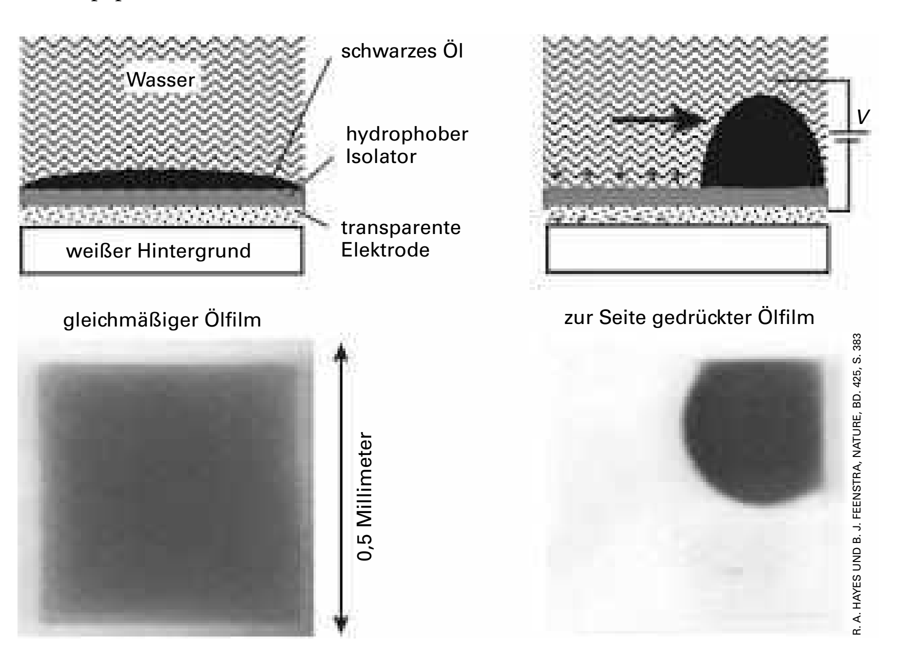
Nach diesem Prinzip sollten sich mit vielen tausend Öltropfen sowohl Texte als auch Graustufenbilder darstellen lassen. Und mit einigen Tricks kann sogar Farbe ins Spiel kommen. Die Bewegung der Tropfen dauert nur wenige Millisekunden, sodass die Bilder rasch wechseln können.

Die wundersamen Fähigkeiten dieses Zauberpapiers beruhen auf der besonderen Beschaffenheit der Folienoberfläche. Sie ist mit einer hauchdünnen Schicht aus einem hydrophoben Kunststoff überzogen. Dadurch wird sie von Öl benetzt, während Wasser daran abperlt.

Aber das allein reicht noch nicht. Die Einbuchtung für ein Pixel enthält unter einem dünnen Glasplättchen außerdem ein wenig Wasser. Normalerweise vermag es das Öl nicht von der Folienoberfläche zu verdrängen. Die Forscher haben jedoch unter dem hydrophoben Überzug zusätzlich eine winzige, nur wenige millionstel Millimeter dicke Glaselektrode angebracht. Damit können sie eine elektrische Spannung erzeugen, welche durch elektrostatische Kräfte das leicht polarisierbare Wasser anzieht. Es strebt folglich zur Oberfläche und schiebt die Ölschicht zur Seite.

Im Experiment begann der Effekt bei etwa fünf Volt. Bei rund zwanzig Volt hatte sich der Öltropfen schon so weit an den Rand des Pixels zurückgezogen, dass der weiße Hintergrund zu gut siebzig Prozent sichtbar war; eine weitere ▷

Der neuartige, elektrisch schaltbare Bildpunkt arbeitet mit Öl und Wasser. Normalerweise benetzt das dunkel gefärbte Öl die hydrophobe (Wasser meidende) Isolatorschicht und erzeugt so einen schwarzen Fleck (links). Wird an eine transparente Elektrode eine Spannung angelegt, verdrängt das Wasser das Öl jedoch von der Oberfläche, und der weiße Hintergrund kommt zum Vorschein.



▷ Erhöhung der Spannung setzte ihn zu neunzig Prozent frei. So ließ sich der Bildpunkt stufenlos von Schwarz über diverse Graustufen auf (fast) Weiß umschalten. Beim Erniedrigen der Spannung kehrte sich der Vorgang um.

Zeitung mit laufenden Bildern

Der Kontrast dieses Bildschirms ist nach Aussage der niederländischen Forscher fast so gut wie bei weißem Papier. Zudem bleibt die Anzeige auch schräg von der Seite erkennbar. Der Clou ist allerdings, dass sich die Pixel mit ihrer Kantenlänge von nur rund einem halben Millimeter innerhalb weniger Millisekunden von weiß auf schwarz umschalten lassen – eröffnet dies doch die prinzipielle Möglichkeit, auch bewegte Bilder mit Videogeschwindigkeit auf dem elektronischen Papier darzustellen.

Einer der schwierigsten Schritte bei der Entwicklung des neuartigen Displays war die Herstellung der hydrophoben Schicht. Sie musste einerseits die Glaselektrode gut genug vom Wasser isolieren, um ein Durchbrechen des Stroms zu verhindern. Andererseits sollte sie so dünn sein, dass relativ kleine Spannungen zur Schaltung eines Pixels ausreichten.

Bisher haben die Philips-Forscher nur an kleinen Gittern mit wenigen Bildpunkten die prinzipielle Machbarkeit ihres Konzepts demonstriert. Als Nächstes wollen sie nun eine Folie mit vielen tausend Pixeln erzeugen, um darauf wirkliche Bilder darzustellen. Schließlich sollen drei unterschiedlich gefärbte Öle auch bunte Anzeigen ermöglichen. Der Weg zur eingangs geschilderten Szene scheint also gar nicht mehr so weit – auch wenn die Älteren unter uns vielleicht nicht mehr in den Genuss dieser neuen Art von Lebensqualität kommen werden. ◁

Stefan Maier ist promovierter Physiker und forscht am California Institute of Technology in Pasadena.

GLOSSE

Deutschland sucht die Superuni

Meme sind nach Richard Dawkins Ideenschnipsel, die sich im öffentlichen Bewusstsein einnisten und durch Mutation und Selektion genauso fortentwickeln können wie Gene. Eines der erfolgreichsten Beispiele aus den letzten Jahren ist zweifellos das Fernsehformat »Pop Idol«, in seiner deutschen Mutante als »Deutschland sucht den Superstar« (DSDS) bekannt. Es hat in wenigen Jahren mehr als ein Dutzend Länder durchseucht, mit Varianten von »American Idol« bis »Operación Triunfo« (Spanien).

Inzwischen ist es dabei, auch auf andere Bereiche der Gesellschaft überzuspringen. Weniger populäre Segmente des Kulturbetriebs versuchen sich im Trittbrettfahren, etwa die klassische Musik mit »Operatic Idol«. Und warum sich auf die Kultur beschränken? Hätten nicht die Demokraten in den USA ihren Präsidentschaftskandidaten gleichfalls auf diese Weise ermitteln können? Gemessen an den Unsummen, die der traditionelle Vorwahlkampf verschlingt, wären die Lizenzgebühren für das Idol-Format Peanuts.

Deutschland ist da schon weiter; hier hat die forsche Edelgard die Zeichen der Zeit und das Superstar-Rezept als Zugpferd erkannt. In unverhohlener Anlehnung an DSDS plant die Ministerin für Bildung und Forschung für den Sommer einen Wettbewerb unter dem Titel: »Brain up! Deutschland sucht seine Spitzenuniversitäten«. Wie beim populären Vorbild soll es eine Jury geben, welche die Bewerber über mehrere Runden ausdünnt. Statt eines Plattenvertrags erhalten die Überlebenden am Ende jedoch Cash: einen Geldtopf in Höhe von insgesamt 250 Millionen Euro.

Noch schweigt die Ministerin sich darüber aus, in welchem Fernsehprogramm ihre Starsuche gesendet werden soll und ob das Publikum in der Endrunde per Telefon abstimmen darf. Auch die Jury-Mitglieder sind noch geheim. Bei Pop Idol gehört zu den vier Juroren ein prominenter Fiesling wie Dieter Bohlen. Gut vorstellen in der Rolle könnte ich mir Gunther von Hagens – dem Leichen-Plastinator würde das Fernsehvolk jederzeit zutrauen, den Kandidaten das Fell über die Ohren zu ziehen.

Das mit dem Fell funktioniert natürlich nicht so recht, wenn eine ganze Universität als Bewerber auftritt. Eine Fakultät ließe sich viel leichter auf eine repräsentative Delegation reduzieren. Oder warum nicht gleich »Deutschland sucht den Superprof«? Personenkult zieht immer. Das hochverehrte Publikum will zwischen Adelheid und Dieter, Fritz und Hannelore auswählen können.

Schon nach wenigen Wochen werden die Finalisten Millionen von Fans haben, selbst wenn sie nicht singen können, im Laborkittel daherkommen und unverständlich über Quantenphysik reden. Die Aufgaben könnten wie bei DSDS als Themenabende organisiert werden. Einen Samstag müssten die Profs etwa



Der Autor in Kontakt mit memhaltigem Material

MICHAEL GROSS

möglichst eindrucksvoll über ihr Fachgebiet dozieren, ein anderes Mal fiktive Haushaltslöcher stopfen und dann vielleicht ein verblüffendes Experiment vorführen.

Ein Problem macht mir allerdings noch Sorgen: Trotz all des monatelangen Siebens in den Idol-Shows bringen die siegreichen Superstars am Ende oft abgrundtief schlechte Popmusik heraus. Was ganz einfach daran liegt, dass die Drahtzieher hinter den Kulissen den kleinsten gemeinsamen Nenner zwischen 5- und 95-Jährigen suchen. Da hilft auch das beste Auswahlverfahren nichts, wenn schließlich die Geldgier den Taktstock schwingt und belanglose Plätschermusik erzeugt.

Wollen wir also hoffen, dass die Superprofs oder Spitzenuniversitäten, wenn Deutschland sie dann gefunden hat, auch wirklich Spitze sind und nicht bloß Meister der Selbstdarstellung.

Michael Groß

www.michaelgross.co.uk

Erste Urmenschen an den Pforten Europas

Menschenfunde im Kaukasus beweisen, dass Hominiden Afrika unerwartet früh verließen. Offenbar standen diese ersten Eurasier dem Ursprung der Gattung *Homo* noch sehr nah.

Von Kate Wong

Der Mensch wagte als einziger Primat immer wieder den Vorstoß in neues, fremdes Land, bis er praktisch die ganze Welt besiedelte. Jetzt lockt ihn sogar der Weltraum.

Den Drang in die Ferne besaßen unsere Vorfahren offenbar nicht von Anfang an. Von den vielleicht sieben Millionen Jahren seit Erscheinen der ersten Vormenschen, der Australopithecinen, blieben die Hominiden die meiste Zeit auf ihrem Heimatkontinent Afrika.

Aus welchen Gründen sie sich dann weiter ausbreiteten, darüber wussten Anthropologen bis vor wenigen Jahren fast gar nichts. Unklar war vor allem, wann jene neue Epoche der Menschheitsgeschichte anbrach – wie modern im anatomischen Sinne diese Pioniere also aussahen. Die bis vor dreizehn Jahren ältesten menschlichen Fossilien von außerhalb Afrikas stammten aus China und Java. Demnach schienen Menschen erst vor wenig mehr als einer Million Jahren – auf der Entwicklungsstufe des *Homo erectus* – von Afrika aufgebrochen zu sein.

Dieser Frühmensch glich uns im Körperbau schon deutlich. Er war viel hochwüchsiger, langbeiniger und mit einem größeren Gehirn ausgestattet als der ältere *Homo habilis*. So nahm die Mehrheit der Paläanthropologen noch in den 1990er Jahren an, dass erst diese Menschenform die körperlichen und geistigen Voraussetzungen mitbrachte, in andere Weltregionen zu gelangen.

Die Forscher fragten sich aber, warum sich *Homo erectus* nicht schon früher auf den Weg gemacht hatte. Denn in Afrika lebten die ersten Mitglieder seiner Art bereits vor 1,9 Millionen Jahren – beziehungsweise von *Homo ergaster*, wie manche Anthropologen die frühen afrikanischen Vertreter bezeichnen, um sie von den Frühmenschen Ost- und Südostasiens abzugrenzen. Ermöglichte erst das richtige Werkzeug die Ausbreitung in andere Klimazonen?

Anscheinend verwendete *Homo erectus* in Afrika in den ersten Jahrhunderttausenden noch die gleichen einfachen Geröllgeräte und grob zugerichteten Abschläge wie vor ihm *Homo habilis*, die für die einfachste Industrie der Altsteinzeit, das Oldowan, charakteristisch sind. Erst vor vielleicht eineinhalb Millionen Jahren erfanden Menschen den langen, flachen Faustkeil – genauer gesagt eine Vielfalt sorgsam symmetrisch behauener Werkzeuge für verschiedenste Funktionen. Damit begann die Acheuléen-Industrie.

Steingeräte dieser Kulturstufe barg der Fundort Ubeidiya in Israel am Jordan. Mit einem Alter von 1,3 bis 1,4 Millionen Jahren galt er bisher als ältester Ort mit sicheren frühmenschlichen Spuren außerhalb Afrikas. Allerdings ist nicht klar, welche Vorteile der neue Werkzeugtyp gegenüber seinen Vorgängern in der Praxis aufwies.

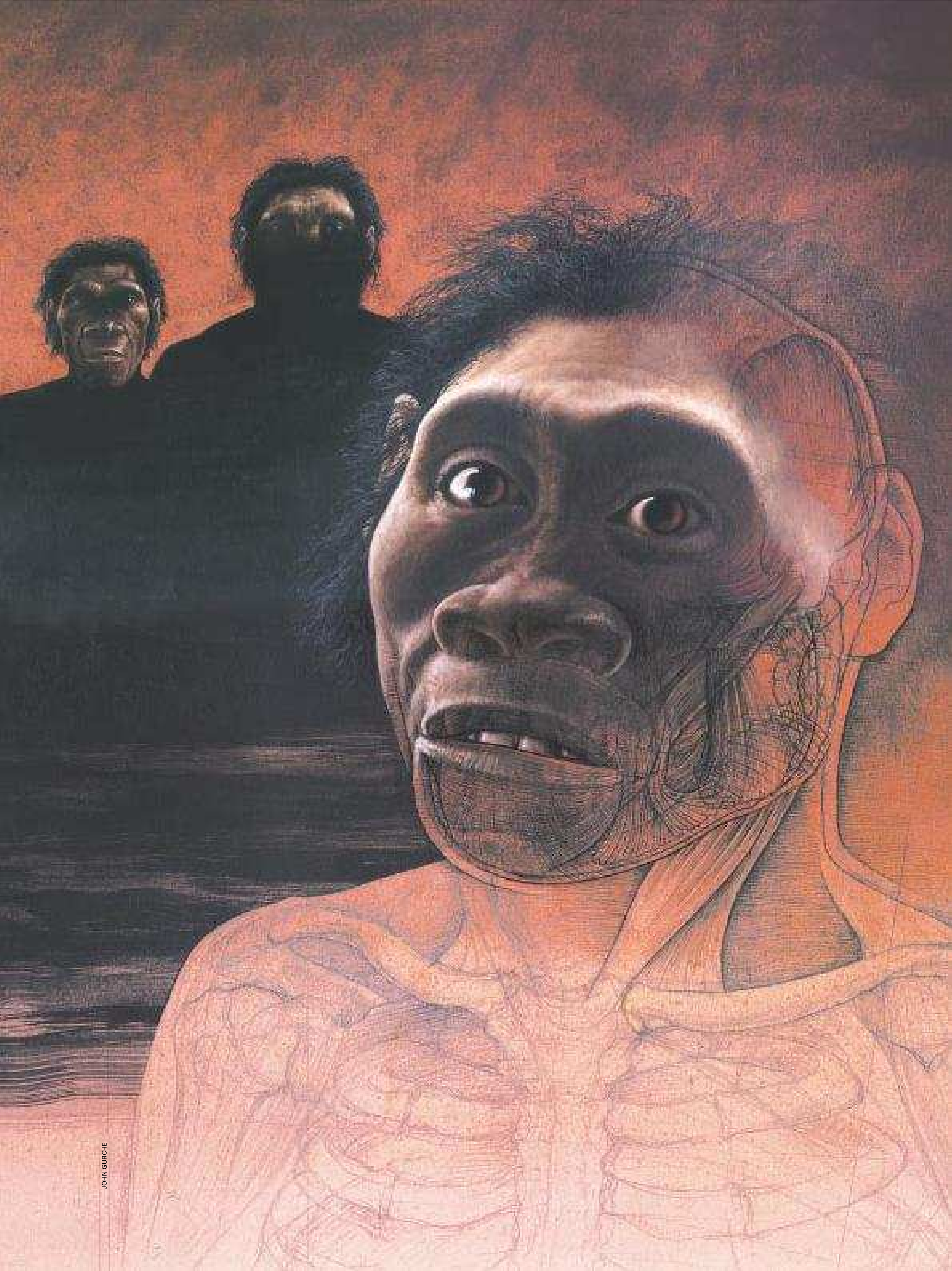
Fossilien und Artefakte aus Dmanisi in Georgien ergeben nun ein völlig anderes Bild von den ersten Menschen in Eurasien. Schon wegen ihres Fossilienreichtums ist die Stätte höchst bemerkenswert. Als Sensation aber gilt das Alter der Fundschicht. Die Menschen, deren ver- ▷

IN KÜRZE

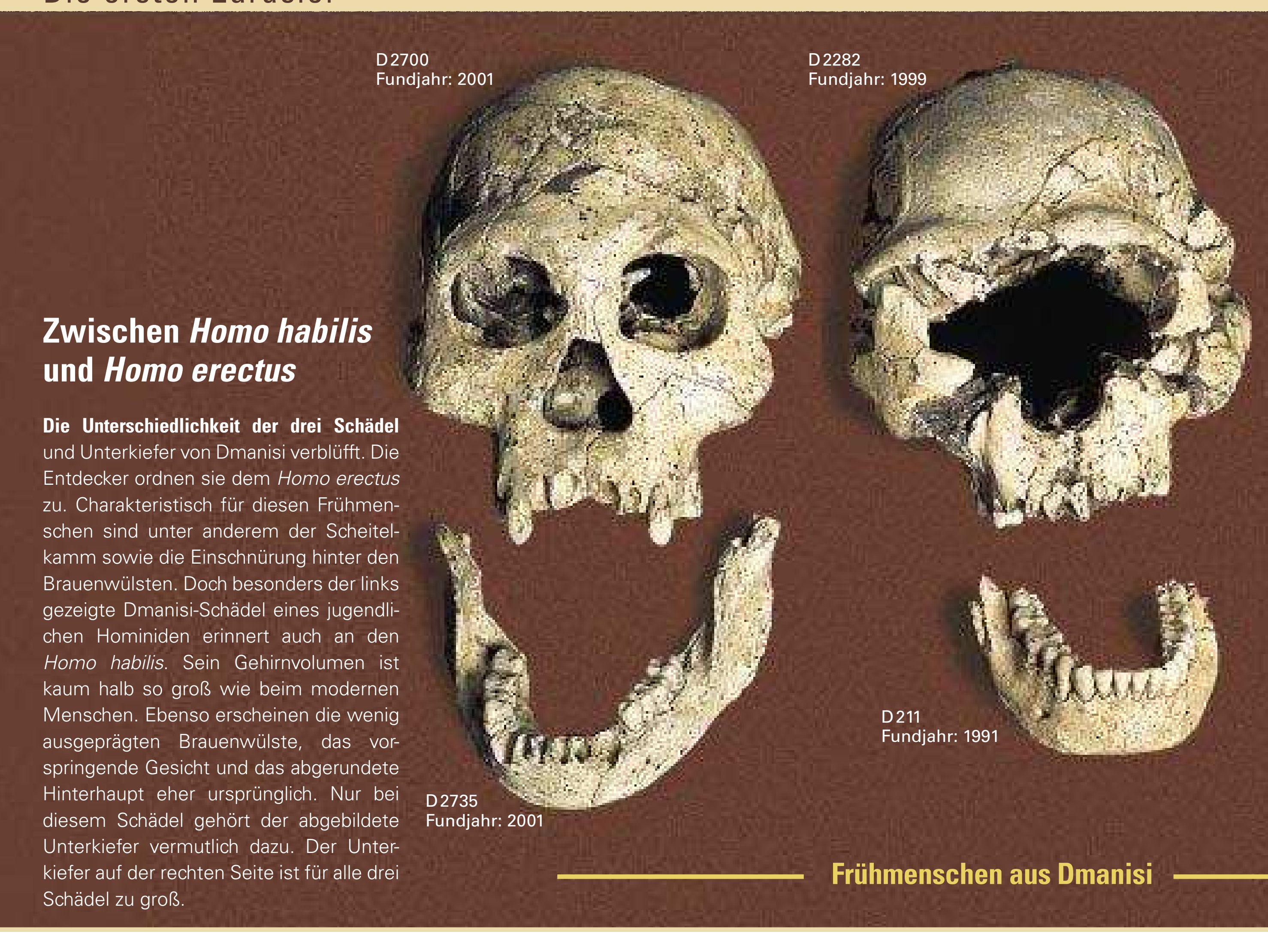
▶ Bisher glaubten Paläanthropologen, dass der Mensch **vor rund einer Million Jahren** nach Eurasien kam und dass er schon hochgewachsen war, ein recht großes Gehirn besaß und fortschrittliche Steinwerkzeuge herstellte.

▶ Kürzlich in **Dmanisi in Georgien** entdeckte Fossilien sind **1,75 Millionen Jahre** alt. Diese Hominiden waren klein und in einigen Merkmalen eher ursprünglich, wenn auch darin auffallend variabel. Sie verwendeten noch primitives Werkzeug.

▶ **Die Hominiden von Dmanisi wirken unterschiedlich weit evolviert. Das kleinste Gehirn besaß ein Teenager (Rekonstruktion im Vordergrund und Bild oben). Die Porträts anhand der drei Schädel aus Georgien entwarf John Gurche.**


JOHN GURCHE

Die ersten Eurasier



Zwischen *Homo habilis* und *Homo erectus*

Die Unterschiedlichkeit der drei Schädel und Unterkiefer von Dmanisi verblüfft. Die Entdecker ordnen sie dem *Homo erectus* zu. Charakteristisch für diesen Frühmenschen sind unter anderem der Scheitelkamm sowie die Einschnürung hinter den Brauenwülsten. Doch besonders der links gezeigte Dmanisi-Schädel eines jugendlichen Hominiden erinnert auch an den *Homo habilis*. Sein Gehirnvolumen ist kaum halb so groß wie beim modernen Menschen. Ebenso erscheinen die wenig ausgeprägten Brauenwülste, das vorspringende Gesicht und das abgerundete Hinterhaupt eher ursprünglich. Nur bei diesem Schädel gehört der abgebildete Unterkiefer vermutlich dazu. Der Unterkiefer auf der rechten Seite ist für alle drei Schädel zu groß.

▷ steinerte Knochen Forscher dort in den letzten Jahren entdeckten, lebten vor rund 1,75 Millionen Jahren – fast eine halbe Million Jahre vor den Gruppen, die in Ubeidiya Spuren hinterließen. Die Hominiden von Dmanisi sahen urtümlicher aus als die bisher vermeintlich ältesten Asiaten. Auch verwendeten sie noch recht primitives Werkzeug.

Erste Menschenfossilien unter Tierknochen

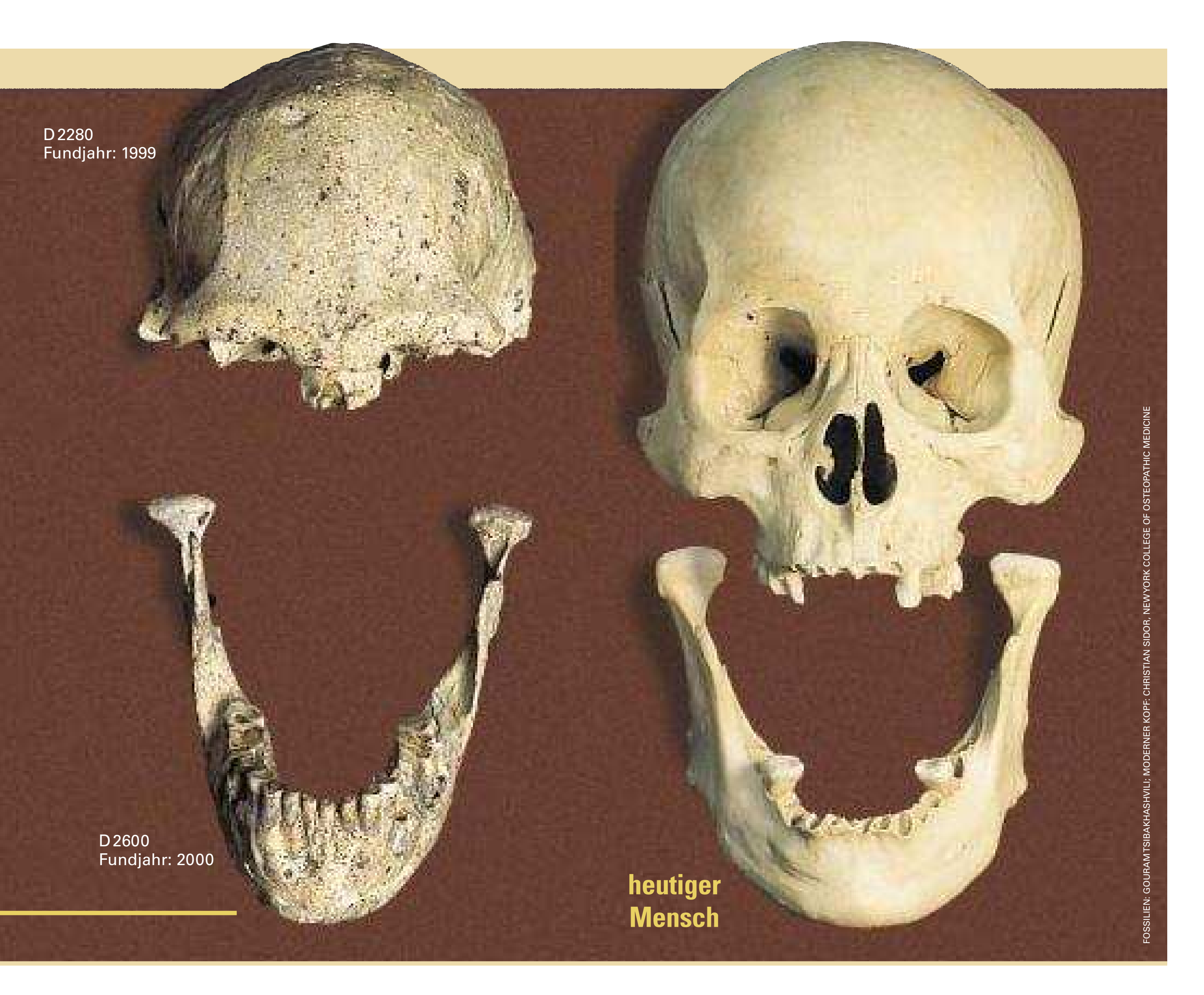
Das heutige Dmanisi ist ein verschlafenes Nest, 85 Kilometer Luftlinie südwestlich von Tiflis und 20 Kilometer von der Grenze zu Armenien entfernt in den Südausläufern des Kleinen Kaukasus gelegen. Archäologen interessieren sich jedoch schon lange für den Ort. Viele Ruinen zeugen von der einstigen Pracht der mittelalterlichen Stadt, die im 12. und 13. Jahrhundert durch ihre Lage an einem der Handelswege der Seidenstraße ihre größte Blüte erlebte. Seit den 1930er Jahren konzentrierten sich Grabungen auf die zerfallenen Gemäuer der mittelalterlichen Festung.

Die Paläontologie wurde auf Dmanisi aufmerksam, als Abesalom Vekua von der Georgischen Akademie der Wissenschaften 1983 in den Profilen einer birnenförmig in den Erdboden gegrabenen Kellergrube die Überreste einer längst ausgestorbenen Nashornart entdeckte. Die Vorratsgruben, welche die Bewohner der Stadt ausgehoben hatten, öffneten auf einmal ein Fenster in die Urzeit.

Im folgenden Sommer fand darum die erste gezielte paläontologische Ausgrabung statt. Zu ihrer Überraschung entdeckten die Forscher diesmal außer vielen Tierfossilien auch primitive Steinzeitwerkzeuge. Augenscheinlich hatten hier schon in der Altsteinzeit Menschen gelebt. Würden sich auch von ihnen Fossilien finden?

Erst 1991, im Rahmen einer ersten georgisch-deutschen Grabungskampagne, an der Mitarbeiter des Römisch-Germanischen Zentralmuseums in Mainz teilnahmen, fand die junge Forscherin Antje Justus in der letzten Woche der Expedition einen menschlichen Unterkiefer (Bild oben). Er lag unter dem Skelett einer großen Säbelzahnkatze.

Die beteiligten Wissenschaftler ordneten den Knochen einem *Homo erectus* zu. Das Alter schätzten sie nach der Fundsituation und ersten radiometrischen Analysen auf etwa 1,6 Millionen Jahre. Diesen Befund stellte Antje Justus zusammen mit David Lordkipanidze und Leo Gabunia von der Georgischen Akademie der Wissenschaften Ende 1991 auf einer paläontologischen Tagung in Frankfurt am Main vor.



Doch von den namhaften Konferenzteilnehmern glaubte ihnen kaum einer. Die meisten Experten hielten es für völlig ausgeschlossen, dass Menschen vor eineinhalb Millionen Jahren so weit nach Asien vorgedrungen waren. Im Übrigen erschien der Unterkiefer den Fachkollegen viel zu unversehrt für ein solch hohes Alter. Jeder Zahn saß noch an seinem Platz. Die Koryphäen der Zunft meinten darum, es handele sich wohl eher um eine jüngere Menschenform.

Das Dmanisi-Team ließ sich von der Abfuhr jedoch nicht abschrecken und setzte die Grabungen fort. Neben der Fossilsuche wurde jetzt die Entstehungsgeschichte des Fundplatzes detailliert dokumentiert, um das Alter der Fundschichten nochmals zu überprüfen. Mit den Jahren stießen bei den Grabungen und den Analysen eine Reihe weiterer Forscher aus Deutschland und aus mehreren anderen Ländern dazu, darunter weitere Mitarbeiter des Römisch-Germanischen Zentralmuseums sowie auch der Datierungsexperte Carl Swisher von der Rutgers-Universität in New Brunswick (US-Bundesstaat New Jersey). Die Ausdauer und die gründlichen Vorarbeiten wurden belohnt: In der Saison 1999 entdeckte das Team zwei gut erhaltene menschliche Schädel (siehe Bild oben). Die Fossilien lagen nur wenige Schritte vom Fundort des Unterkiefers knapp zwei Meter voneinander entfernt im Boden. Im Mai 2000 präsentierten die Forscher die Befunde der Öffentlichkeit in einem Artikel in der Wissenschaftszeitschrift »Science«.

»In dem Jahr ging der Rummel los«, erinnert sich der heutige Grabungsleiter Lordkipanidze. Die beiden Dmanisi-Schädel veränderten die Vorstellungen von der ersten menschlichen Besiedlung Asiens von Grund auf. Beide Fossilien lassen in ihren morphologischen Merkmalen eine enge Verwandtschaft dieser Hominiden mit dem frühen *Homo erectus (Homo ergaster)* Afrikas annehmen. Unter anderem ist die Form der Augenbrauenwülste ausgesprochen ähnlich. Im Gegensatz dazu weisen die ältesten Frühmenschen aus Ostasien und Westeuropa stärker für die jeweilige Region spezifische Körpermerkmale auf.

Hohes Alter bestätigt

Das Alter der Fossilien hatten die amerikanischen Geologen nun durch zusätzliche Detailanalysen eingegrenzt. Das Ergebnis bestätigte die frühere Altersbestimmung. Die Menschenknochen lagen in Sedimenten, welche direkt auf einer dicken Schicht basaltischen Lavagesteins abgelagert waren. Radiometrische Messungen ergaben für den Basalt ein Alter ▷

▷ von 1,85 Millionen Jahren. Da die Oberfläche der Lava kaum verwittert war, kann es nicht lange gedauert haben, bis die Sedimente mit den Fossilien sie bedeckten. Die fossilführenden Sedimente selbst dürften paläomagnetischen Untersuchungen zufolge vor etwa 1,77 Millionen Jahren entstanden sein – am Ende des so genannten Olduvai-Events, einer positiven Magnetschwankung vor 1,97 bis 1,77 Millionen Jahren in der ansonsten negativ magnetisierten Matuyama-Epoche. Unzählige Knochen von ausgestorbenen Tieren in derselben Schicht bestätigen das hohe Alter. Zum Beispiel lebten Wühlmäuse der Gattung *Mimomys* vor 2 bis 1,6 Millionen Jahren.

Die Zweifel waren damit ausgeräumt: Außerhalb Afrikas liefert Dmanisi die bis heute ältesten menschlichen Fossilien – wie überhaupt die frühesten unstrittigen Menschenspuren. Für die Paläanthropologie bedeutete das ein völliges Umdenken: Nicht nur haben Menschengruppen Eurasien augenscheinlich einige hunderttausend Jahre früher erreicht als bisher angenommen. Sondern diese Menschen besaßen auch noch keine fortschrittlichen Werkzeuge. Die Steingeräte von Dmanisi gehören allesamt zur Oldowan-Kultur. Die Acheuléen-Industrie mit den Faustkeilen war noch nicht erfunden.

Die nächsten Jahre sollten die althergebrachten Vorstellungen der Paläanthropologie noch mehr erschüttern. Im Juli 2002 gab Lordkipanidzes Team den Fund eines dritten Menschenschädels bekannt (Bild S. 24 und S. 26, ganz links). Der fast vollständige Schädel samt Unterkiefer eines noch nicht ganz erwachsenen Individuums, der im Sommer 2001 ausgegraben wurde, weist diesen Menschen als einen der bisher urtümlichsten Vertreter der menschlichen Gattung *Homo* überhaupt aus. Sein Hirnvolumen betrug gerade 600 Kubikzentimeter – kaum die Hälfte des Volumens wie beim modernen Menschen.

Verblüffende Variabilität der Frühmenschen von Dmanisi

Die beiden anderen Schädel enthielten immerhin 770 und 650 Kubikzentimeter Hirnvolumen. Selbst das war für einen *Homo erectus*, zumal in Asien, recht wenig. Es reichte aber immerhin knapp an das Volumen eines frühen *Homo erectus (Homo ergaster)* in Afrika heran. Auch in der Form ähnelt der neue Schädel dem *Homo erectus* weniger als die beiden anderen: Eher erinnern die wenig ausgeprägten Augenbrauenwülste, der vorspringende Gesichtsschädel und die Rundung des Hinterhaupts an dessen vermeintlichen Vorfahren, den *Homo habilis* – der sich nach neuerer Auffassung in mehrere Arten mit teils strittiger Zugehörigkeit zur Gattung *Homo* aufteilt (siehe Stammbaumschema unten).

Die Frühmenschen von Dmanisi, oder zumindest einige von ihnen, waren nicht nur erstaunlich kleinhirnig, sondern wohl auch eher niedrig im Wuchs. Soweit die bisher gefundenen Skelettfragmente erkennen lassen, überragten sie den *Homo habilis* kaum. Noch harren diese Knochen der wissenschaftlichen Beschreibung. Aufgetaucht sind bisher einige Rippen- und Schlüsselbeinteile, ein paar Wirbel sowie Knochen von Oberarm, Hand und Fuß.

»Zum ersten Mal haben wir eine Zwischenform zwischen *erectus* und *habilis* vor uns«, stellt Lordkipanidze fest. Zwar hat das Team die Fossilien vorläufig als zum *Homo erectus* gehörig eingestuft, denn sie weisen einige Merkmale auf, die diesen Frühmenschen charakterisieren. Lordkipanidze vermutet aber, dass die Hominiden von Dmanisi nahe dem Ursprung dieser moderneren Art stehen und vom evolutionären Übergang vom *Homo habilis* – im weiten Sinne – zum *Homo erectus* zeugen.

Noch streiten die Forscher, wie sie das offenbar weit gefächerte Erscheinungsbild der Dmanisi-Fossilien deuten sollen. Schon im Sommer 2000 war ein

Artenvielfalt oder Variabilität?

Der Stammbaum des Menschen

Wie viele Arten die Gattung *Homo* hervorbrachte, ist in Fachkreisen umstritten. Für die Diskussion liefern die Funde von Dmanisi neuen Zündstoff. Es könnten bis zu acht Arten sein, von denen einige allerdings in entwicklungsgeschichtlichen Sackgassen endeten (obere Darstellung). Dann würden die Hominiden von Dmanisi eine eigene Art, *Homo georgicus*, darstellen. Im anderen Extrem hätte es nur drei Arten gegeben, die in einer Entwicklungslinie stehen (untere Darstellung). Dann wären die georgischen Fossilien zwischen *Homo habilis* und *Homo erectus* einzuordnen. Die auffällige Bandbreite von Merkmalen bei den Dmanisi-Menschen wäre als beträchtliche Variabilität innerhalb der Population zu deuten.

CORNELIA BLIK, PATRICIA J. WYNNE UND EDWARD BELL

Primitive und fortschrittliche Industrie

Einfachste Werkzeuge im Oldowan-Stil (Chopper) fertigten die Menschen von Dmanisi, indem sie Geröllsteine an einer Seite abschlugen (links und Mitte). Den Faustkeil, der erst im Acheuléen aufkam, kannten sie noch nicht (rechts).



Werkzeuge aus Dmanisi, einflächig behauen

Faustkeil des Acheuléen, symmetrisch zweiseitig behauen

GOURAMTSIBAKHASHVILI

auffallend massiger Unterkiefer hinzugekommen (Bild S. 26/27, rechts). Laut dem Anthropologen Jeffrey Schwartz von der Universität Pittsburgh (Pennsylvania) könnte es sich durchaus um zwei oder noch mehr verschiedene Frühmenschenarten handeln. Der Paläanthropologe Milford H. Wolpoff von der Universität von Michigan in Ann Arbor hält es für wahrscheinlicher, dass der kompakte Unterkiefer von Dmanisi einem Mann gehörte, während alle anderen Schädel und Kiefer von Frauen stammen.

Der mächtige Unterkiefer bereitet Lordkipanidze schon »ein wenig Kopfschmerzen«. Da aber all diese menschlichen Fossilien aus derselben geologischen Schicht kommen, müssten sie seiner Ansicht nach auch von derselben Population von *Homo erectus* stammen. Er bewertet die Vielfalt jener Fossilien als einen der wertvollsten Befunde der Ausgrabungen in Dmanisi. Darin sieht er eine Chance, die Variabilität in einer frühen Menschengruppe zu erahnen. Tatsächlich könnten die Forscher diesen Faktor beim *Homo erectus* bisher unterschätzt haben. Das lassen auch neuere Funde von Bouri am Mittellauf des Awash in Äthiopien sowie von Ileret in Kenia vermuten.

Der georgische Forschungsleiter hält es sogar für möglich, dass die Kaukasusfunde, wenn sie noch besser untersucht sind, Anlass bieten, einen Teil der afrikanischen Fossilien im Einzelnen neu einzuordnen. Bei manchen könnte es die Geschlechtszugehörigkeit betreffen, bei anderen sogar die Artzugehörigkeit. Vor allem würde damit aber die Frage berührt, wer die Linie begründete, die zum *Homo sapiens* führte. »Vielleicht war der *habilis* ja noch gar kein *Homo*«, sinniert Lordkipanidze. Manche Anthropologen überlegen in letzter Zeit tatsächlich, ob dieser Hominide eher noch zu den Australopithecinen gehörte.

Waren es schon Menschen?

Denn betrachtet man *habilis* nach den strengen Kriterien der wissenschaftlichen Klassifikation, so müsste man ihn nicht zwingend unserer eigenen Gattung zuordnen. Gehirn und Körperproportionen, Kiefer und Zähne sowie die Bein- und Beckenstellung machen ihn einem *Australopithecus* ähnlicher, als er bisher dargestellt wird. Diese Meinung äußert der Paläanthropologe Bernard Wood von der George-Washington-Universität in Washington (District of Columbia), der die Zuordnung sehr früher afrikanischer *Homo*-Formen untersucht hat. Möglicherweise war sogar erst der *Homo erectus* die älteste Art der Gattung *Homo*. Wood überlegt sogar, ob dann die Dmanisi-Hominiden wohl noch Australopithecinen darstellten.

Auch ihre vermutlich kleine Statur passt schlecht zu den bisherigen Theorien über die Besiedlung Asiens. In den 1980er Jahren brachten Alan Walker und Pat Shipman von der Pennsylvania State University in University Park die folgende These auf, die William R. Leonard von der Northwestern-Universität in Evanston (Illinois) und seine Kollegen weiter ausgearbeitet haben (siehe dazu den Artikel in Spektrum der Wissenschaft 5/2003, S. 30): Der *Homo erectus* habe wegen seiner Körpergröße und des größeren Gehirns mehr Energie und höherwertige, ergiebigere Nahrung benötigt als seine Vorgänger. Darum musste er Fleisch essen – was wiederum bedeutete, dass sein Raumbedarf, also sein Lebensradius stieg, denn Tiere sind weiter verteilt als Pflanzen, und er war gezwungen, zur Nahrungsbeschaffung längere Strecken zurückzulegen. Folglich musste sich der *Homo erectus* stärker ausbreiten. So könnte er schließlich auch immer tiefer nach Asien eingedrungen sein. Vielleicht folgte er sogar Tierherden.

Viel besser lässt sich nachvollziehen, wieso sich die frühen Eurasier im südlichen Kaukasus aufhielten. Die Lage zwi- ▷

schen Schwarzem und Kaspischem Meer garantierte zu jener Zeit offenbar ein für diese Breiten recht mildes Klima, wohl ähnlich wie heute am Mittelmeer. Außerdem scheint die Gegend ein reiches Mosaik ökologisch verschiedener Lebensräume geboten zu haben. Paläontologen finden dort sowohl Fossilien von Bewohnern lichter Wälder, zum Beispiel Hirschen, als auch von charakteristischen Steppentieren wie Pferden. In dieser abwechslungsreichen Landschaft mussten primitive Menschen nicht weit ziehen, wenn das Leben an einem Ort zu schwierig wurde. Speziell die Fundstätte von Dmanisi lag sehr günstig auf einer erhöhten Landzunge, an der zwei Flüsse zusammentreffen. Das bot den Frühmenschen viele Vorteile. Nicht zuletzt fand sich an den Ufern sicherlich viel Wild ein.

»Hier herrschte reges Treiben«, meint Martha Tappen von der Universität von Minnesota in Minneapolis, die im Dmanisi-Team mitarbeitet. Die Anthropologin untersucht, warum gerade an dieser Stelle dermaßen viele Tierfossilien liegen.

Feldforschung in Dmanisi

Den ersten Eurasiern auf der Spur

Dmanisi, Georgien, im Juli.
Nur zwei Stunden dauert die Autofahrt von Tiflis nach Dmanisi, doch die beiden Orte scheinen Welten voneinander entfernt. Über der Hauptstadt Georgiens liegen Lärm und Hektik, Staub und der Gestank von Dieselmotoren. In Dmanisi in den südlichen Ausläufern des Kleinen Kaukasus duftet es nach Heu, und das Straßenbild bestimmen Eselskarren und spielende Kinder. Die Menschen leben hauptsächlich vom fruchtbaren Boden und der Viehzucht.

Schwer kann man sich vorstellen, dass hier einst eine florierende, mächtige Stadt stand, bei der sich wichtige Handelsstraßen der Perser und Byzantiner kreuzten. Dabei ist die Landschaft mit Spuren dieser Vergangenheit übersät. An einem Abhang haben Regengüsse mittelalterliche Gräber enthüllt. Hügel, die wie Heumieten aussehen, entpuppen sich als muslimische Grabstätten. Über allem steht die imposante Ruine einer Festung. Von dem Felssporn aus ließ sich weit die Seidenstraße entlang sehen.

Für archäologische Grabungen ist dies seit langem ein ergiebiger Ort. Aber erst in den letzten beiden Jahrzehnten entwickelte er sich zu einer paläanthropologischen Fundstätte ersten Ranges. Denn mittlerweile scheint sicher, dass eine frühe Menschenpopulation die Lage schon vor 1,75 Millionen Jahren schätzte – viel

Wo im Mittelalter die mächtige Stadt Dmanisi stand, hatten schon in frühester Zeit Menschen gelebt. Noch haben Paläanthropologen erst einen Bruchteil der Fläche abgegraben.



GOURAM TSIBAKHASHVILI

Tausende von Säugetierknochen kamen bereits zum Vorschein. Viele stammen von Huftieren und ein beträchtlicher Anteil von großen Raubtieren, beispielsweise von Säbelzahnkatzen, Leoparden, Bären, Hyänen und Wölfen. Die Forscherin vermutet, dass die Landzunge für viele Tiere eine Falle darstellte. Fleischfresser konnten dort ziemlich bequem Beute schlagen. »Wir fragen uns nur, ob die Hominiden das gleichfalls taten.«

Bisher hat Martha Tappen an den Tierknochen zwar ein paar Schnittspuren entdeckt – ein Hinweis, dass die Dmanisi-Menschen zumindest gelegentlich Tiere zerlegten. Ob sie sich allerdings meistens von Raubtieren gerissenes Wild aneigneten oder auch selbst Tiere erlegten, lässt sich bisher nicht beantworten. Eines der Szenarien zur Ausbreitung des Menschen besagt, dass er kältere Zonen besiedeln konnte, weil er zum Jäger und Sammler geworden war. Die Australopithecinen hatten vorwiegend Pflanzenkost gegessen. Diese war weiter nördlich im Winter rar. Dass die Hominiden vom Kaukasus in der Hauptsache ▷

früher, als nach bisheriger Kenntnis überhaupt Menschen in Eurasien auftauchten.

Wenn der heutige Grabungsleiter und stellvertretende Direktor des Georgischen Nationalmuseums in Tiflis David Lordkipanidze von den menschlichen Fossilfunden spricht, scheint er darüber immer noch zu staunen. Sie sind die bei weitem ältesten auf asiatischem Boden. Bei der Bergung des ersten Unterkiefers vor dreizehn Jahren war er dabei. Seitdem hat ein wechselndes internationales Team Tausende von fossilen Tierknochen, zweitausend primitive Steinwerkzeuge und vier weitere Menschenschädel sowie eine Anzahl menschlicher Skelettfragmente ausgegraben. »Dass wir diese wunderbaren Fossilien gefunden haben, war schon ein riesiges Glück«, meint Lordkipanidze. Das bedeute aber auch »eine sehr große Verantwortung«. Er scheint Tag und Nacht zu arbeiten. Sein Posten erfordert genauso viel wissenschaftlichen Einsatz wie organisatorisches Talent. Noch spät in der Nacht telefoniert er mit Kollegen in aller Welt und mit potenziellen Geldgebern.

Anfangs bestand das Team der Ausgräber und beteiligten Wissenschaftler aus etwa zehn deutschen und georgischen Forschern. Mittlerweile wirken rund dreißig Wissenschaftler und Studenten aus verschiedensten Ländern mit. Viele von ihnen sind auch in diesem Sommer hierher gekommen. Während der acht Wochen der jährlichen Feldkampagne müssen sie praktisch auf allen westlichen Komfort verzichten.

Jeden Morgen bringt sie ein ausgedientes Militärfahrzeug von der einfachen Unterkunft, wo sich meist vier Leute einen winzigen Raum teilen, zur Grabungsstätte. Der meiste Betrieb herrscht dort zurzeit auf einem 20 mal 20 Meter großen abgesteckten Areal (siehe Bild oben). Hier tauchte im Jahr 2001 der dritte – nahezu vollständige – frühmenschliche Schädel auf, der erste mit zugehörigem Unterkiefer. Jeder der Teilnehmer bearbeitet sorgsam ein ein Quadratmeter großes Stück. Beim Abtragen des Sediments wird die Lage jedes Fossils oder Artefakts minutiös festgehalten. Anschließend werden die Fundstücke beschriftet und eingetütet. Selbst unauffällige Steinchen und Erde heben die Mitarbeiter auf. Manchmal enthalten die Sedimente Muscheln oder winzige Tierknochen, die Hinweise auf die damalige Umwelt liefern.

An diesem Morgen ist die Laune der Mannschaft wesentlich besser als gestern, als sie wegen Regen nicht graben konnten: Nasse Knochenfossilien zerfallen zu leicht. Solche Wetterlagen sind hier im Sommer aber selten, und als sich auch die Nebeldecke über den Berghängen verzieht, stimmt einer der Fossiljäger den Song »I can see clearly now« von Johnny Nash an. Andere fallen ein, und bald übertönt der Gesang fast das helle Hämmern und Schaben. Die Leute müssen sehr vorsichtig und langsam arbeiten, wenn sie das feste Sediment abtragen. Darin eingebackene Steine und Fossilien dürfen sie nicht anschrammen. Man könnte die frischen Kratzer sonst für alte halten.



MARC MEYER, UNIVERSITY OF PENNSYLVANIA

▲ **Mit Spatel und Pinseln holen die Mitarbeiter die Fossilien und Steinartefakte aus dem Sediment.**

Andere Mitarbeiter arbeiten in der Unterkunft in einem provisorischen Labor, wo sie sich ein uraltes Mikroskop teilen. Sie bestimmen und sortieren die Fossilien, die ihnen gebracht werden, und untersuchen sie auch auf Bruchflächen und Zahnspuren. Frühere Funde von derselben Stelle weckten den Verdacht, dass Säbelzahnkatzen ihre Beute hierher in eine Höhle schleppten. In einem Areal nur hundert Meter weiter könnten jedoch Menschen tätig gewesen sein. Dort fanden sich zahlreiche Knochenreste, die auf eine Weise zertrümmert sind, wie man es eher Hominiden zutrauen würde. Diese Stelle könnte Aufschluss darüber liefern, wie sich die frühen Menschen in dieser Gegend durchschlugen.

Die Ausgräber kehren erst am Nachmittag zurück. Wer Lust hat, besucht nach dem Essen noch die »Mall«, den kleinen Dorfladen. Hier bekommt man Luxusgüter wie Zigaretten, Softdrinks und Süßigkeiten. Den Abend verbringen viele im Labor.

Lordkipanidze würde in Dmanisi gern ein Trainingslager aufbauen, wo angehende Archäologen und Anthropologen die Finessen der Feldarbeit kennen lernen könnten. Außerdem möchten er und seine Kollegen die Fossilsuche auf andere Orte der Region ausweiten, die ebensfalls viel versprechend erscheinen. Vielleicht liegt auch dort noch manche Überraschung begraben.

Zeit der Pioniere

Atapuerca 0,78
Ceprano 0,8
Dmanisi (Georgien) 1,75
Donggutuo (China) 1,0
Orce 1,0 ?
Ubeidiya (Israel) 1,3 – 1,4
Riwat (Pakistan) 2,0 ?
Gongwangling (China) 1,1
Bahr el Ghazal (Tschad) 3 – 3,5
Hadar (Äthiopien) 3 – 3,4
Turkana (Kenia) 1,6 – 1,9
Olduwai-Schlucht (Tansania), 1,2 – 1,8
Laetoli (Tansania) 3,6
Java (Indonesien) 1,8 ?
alle Zahlenangaben in Millionen Jahren
Australopithecinen
Homo habilis
Homo ergaster/Homo erectus
andere Formen von *Homo*
Fundplätze von Steinwerkzeugen ohne Fossilien von Hominiden
Sterkfontein (Südafrika) 2,5
Swartkrans (Südafrika) 1,5 – 2,0

EDWARD BELL

Die Funde von Dmanisi belegen erstmals: Jenseits von Afrika erschienen Menschen schon vor über 1,75 Millionen Jahren. Die Besiedlung Ostasiens ist erst für die Phase vor etwa 1,1 Millionen Jahren sicher belegt. Nach Europa kamen Menschen anscheinend noch um einiges später.

▷ Aasjäger waren, kann sich Martha Tappen schwer vorstellen. »Kadaver aufzustöbern ist ein so unsicheres Geschäft«, meint sie dazu. »Das dürfte kaum die Hauptstrategie dieser Menschen gewesen sein, um sich Fleisch zu beschaffen.«

Manchmal wurden diese Leute anscheinend auch zur Beute. Martha Tappen identifizierte an einem der Menschenschädel Einkerbungen von Raubtierzähnen. Und an dem größten Unterkieferfossil fand sie Spuren, die aussehen, als hätte ein großes Tier darauf herumgebissen.

Wie die Geschichte des Menschen in Eurasien nach »Dmanisi« weiterging, ist noch ein großes Rätsel. Einzelne Fundplätze in Asien wie Europa sollen sehr alte Artefakte enthalten, doch dies ist strittig. Auch dass einige menschliche Fossilien von Java angeblich 1,8 Millionen Jahre alt sind, halten manche Experten für einen Irrtum, obwohl neuere Analysen das hohe Alter offenbar bestätigen.

Ansonsten klafft bis zu den nächsten Funden mit gesichertem Alter eine riesige zeitliche Lücke. Die außerhalb Dmanisis ältesten Menschenfossilien Asiens sind nur wenig über eine Million Jahre alt, die aus Europa etwa 800 000 Jahre. Sie stammen von Ceprano in Mittelitalien und von Atapuerca in Nordspanien. Soweit sich dies bisher sagen lässt, kämen die Dmanisi-Leute als Vorfahren des späteren *Homo erectus* Asiens in Betracht. Genauso gut könnte ihre Linie aber ausgestorben sein. Vielleicht waren sie Pioniere einer ersten Auswanderungswelle, die nur kleine Teile Eurasiens erreichte. So wie sicherlich immer wieder Menschengruppen nach Eurasien gelangten, zogen offenbar auch wiederholt welche von dort nach Afrika.

Dmanisi wird mit Sicherheit noch viele aufschlussreiche Funde liefern. Die Paläontologen haben erst einen sehr kleinen Ausschnitt der fossilhaltigen Fläche gründlicher bearbeitet. Und schon jetzt finden sie versteinerte Knochen schneller, als sie diese inspizieren können.

Im Sommer 2002 kam ein vierter Menschenschädel zum Vorschein, der zurzeit noch präpariert und untersucht wird. Im letzten Sommer entdeckten die Forscher einen weiteren menschlichen Unterkiefer sowie ein Schienbein und ein Sprungbein vom Fuß. Am sehnlichsten hoffen sie nun, auch noch Oberschenkel- und Beckenknochen zu finden. Dann könnten sie die Körperproportionen dieser Frühmenschen rekonstruieren und daraus erschließen, ob sie größere Distanzen zurückzulegen vermochten. Wie es aussieht, dürfte Dmanisi noch einige Forschergenerationen in Atem halten. ◁

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE



Kate Wong ist Redakteurin bei Scientific American.

Homo erectus vor 1,75 Millionen Jahren an der Schwelle Europas? Von Antje Justus, Olaf Jöris und Medea Nioradze in: Archäologie in Deutschland, 2/2000, S. 12

Evolution des Menschen II. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1, 2004

Menschwerdung. Von Winfried Henke und Hartmut Rothe. S. Fischer-Verlag, Frankfurt/Main, 2003

Louis de Bonis: Vom Affen zum Menschen. Teil 2: Evolution des Menschen. Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Wettrüsten gegen ein mörderisches Virus

Kein Erreger ist so gut erforscht wie das Aids-Virus. Und doch ist es noch lange nicht besiegt. Neue Therapieansätze sollen das Virus jetzt von anderer Seite angreifen.

Von Barbara Müller und Hans-Georg Kräusslich

Es ist gerade einmal zwanzig Jahre her, dass am Pasteur-Institut in Paris – und wenig später auch in den USA – ein mörderisches Virus entdeckt wurde: das humane Immundefizienz-Virus HIV, Ursache der erworbenen Immunschwächeerkrankung Aids.

Zu diesem Zeitpunkt war kaum vorstellbar, mit welcher Geschwindigkeit und in welch verheerendem Ausmaß sich der Erreger über den Erdball ausbreiten würde. War Aids vor einem Vierteljahrhundert noch unbekannt, so rechnet die Weltgesundheitsorganisation derzeit mit 14 000 Neuinfektionen pro Tag. Nach aktuellen Schätzungen tragen etwa 40 Millionen Menschen das HI-Virus in sich. Ganze 25 Millionen sind bereits an den Folgen der Erkrankung gestorben und täglich kommen etwa 8500 weitere Tote hinzu. Aids ist damit die häufigste einzelne Todesursache.

Die Entdeckung des Virus beflügelte die Wissenschaft. Weltweit wetteiferten Forscher, um die Geheimnisse seiner Vermehrung zu entschlüsseln und mögliche Angriffspunkte für die Therapie zu finden. So wissen wir heute weit mehr über HIV als über jeden anderen Erreger. Was aber für die Patienten mehr zählt: Bereits 1987 – nur vier Jahre nach der Entdeckung von HIV – wurde Azidodesoxythymidin, kurz AZT, als erstes Medikament zur Behandlung von Aids zugelassen. Der anfängliche Erfolg schien viel versprechend. Mitte der 1990er Jahre stellte die Industrie sogar die Suche nach neuen HIV-Therapeutika weit gehend ein, da man das mittlerweile vorhandene Arsenal für ausreichend hielt. Doch weit gefehlt: Obwohl inzwischen mehr Wirkstoffe für die Aids-Therapie zur Verfügung stehen als bei jeder anderen Viruserkrankung, ist der Kampf gegen den gefürchteten Erreger noch längst nicht gewonnen. Es ist wie in der Fabel von Hase und Igel: Gleich welche Strategien die Forscher zur Bekämpfung von HIV ersinnen – stets wartet das Virus mit neuen resistenten Varianten auf, die den Angriff parieren.

Meister der Tarnung

Diese Eigenschaft des Erregers hat bisher auch sämtliche Versuche einer effektiven Schutzimpfung scheitern lassen. Dem Verwandlungskünstler HIV gelingt es durch Verändern seiner Hülle, den Angriff von Antikörpern und Immunzellen, die gegen bestimmte Virusstrukturen gerichtet sind, ins Leere laufen zu lassen. Aus diesem Grund wird die antivirale Therapie auf absehbare Zeit die entscheidende Waffe im Kampf gegen Aids bleiben. Doch diese muss ständig neu geschmiedet werden.

Alle bislang zugelassenen Medikamente gegen HIV greifen direkt in dessen Vermehrungszyklus ein (siehe Schema S. 36/37). Der Erreger befällt vorwiegend Immunzellen, die ein so genanntes CD4-Molekül auf ihrer Oberfläche tragen. Nach dem Andocken verschmelzen die Hüllen von Virus und Zelle miteinander, und die Fracht, bestehend aus dem viralen Genom sowie mehreren Virusenzymen, gelangt ins Zellinnere. Dass die Erbsubstanz des Virus aus RNA und nicht wie bei den infizierten Zellen aus DNA besteht, ist kein Problem: Eines der mitgebrachten Enzyme, die Reverse Transkriptase, schreibt sie in doppelsträngige DNA um. Diese wird in den Zellkern transportiert und dort von einem weiteren Virusenzym, der Integrase, in das Erbgut der Wirtszelle eingebaut. Die Virusgene werden nun wie zelleigene Erbinformation abgelesen. Ihre Arbeitskopien wandern ins Zellplasma und dienen dort als Bauanleitung für neue Virusproteine. Diese gelangen zur Zellmembran, lagern sich mit dem ebenfalls vervielfältigten Virusgenom zu neuen Viruspartikeln zusammen und »knospen« schließlich aus

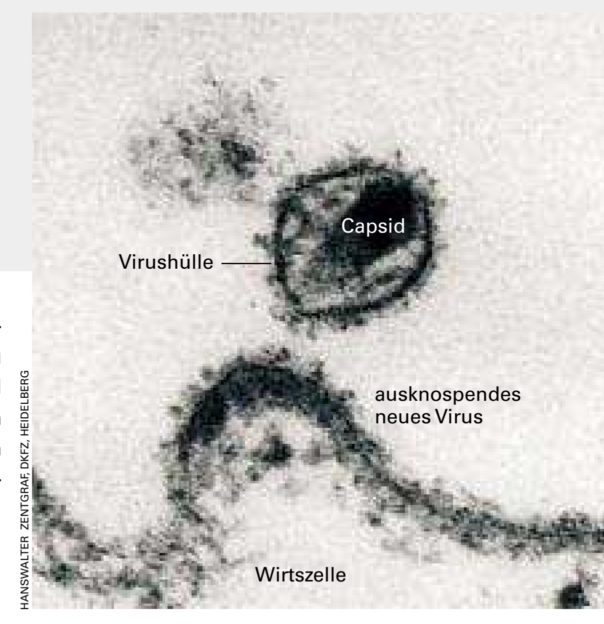
IN KÜRZE

- Das Aids-Virus HIV vermehrt sich rasant und ist äußerst wandelbar. In einer Art **Evolution im Zeitraffer** entstehen schnell **Resistenzvarianten**, gegen die das vorhandene Arsenal an Medikamenten machtlos ist. Dies ist auch einer der Gründe dafür, dass es bislang keine Schutzimpfung gibt.
- Die Resistenzentstehung muss genau beobachtet werden. Nur so kann man **ausgeklügelte Therapiepläne** entwickeln, mit denen sich der Erreger lange in Schach halten lässt.
- Um mit dem Auftreten resistenter Viren Schritt zu halten, werden verfügbare **Wirkstoffe ständig verbessert**. Noch wichtiger ist es, **neue Angriffspunkte** für die Therapie zu finden, um auch mehrfach resistente Viren zu bekämpfen.

ULLSTEINBILD

der Wirtszelle aus. In einem letzten Reifungsschritt wird erneut ein HIV-Enzym, die Protease, aktiv. Sie zerschneidet im Inneren des Partikels Vorläuferformen bestimmter Virusproteine in funktionsfähige Untereinheiten. Erst dadurch wandelt sich das Virus in seine infektiöse Form um und kann neue Zellen befallen.

Die meisten derzeit erhältlichen Medikamente richten sich gegen die Reverse Transkriptase (RT) oder die Protease von HIV. RT-Hemmer blockieren in einer befallenen Zelle die Übersetzungsarbeit des Enzyms. Als Folge entsteht keine einbaufähige DNA-Form des Virus-Genoms, und der Vermehrungszyklus des Virus wird unterbrochen. Eine Untergruppe der RT-Inhibitoren, zu der auch das älteste Aids-Medikament AZT gehört, ähnelt den als Nukleoside bezeichneten Bausteinen der DNA. Allerdings fehlt der Anknüpfungspunkt für den folgenden Kettenbaustein. Das Enzym hängt diese falschen Bausteine an den in Arbeit befindlichen DNA-Strang an und bereitet damit dessen Verlängerung ein vorzeitiges Ende. Eine zweite Untergruppe von RT-Inhibitoren attackiert das Enzym von einer anderen Seite und legt ihm gewissermaßen Handschellen an: Es blockiert die notwendigen Bewegungen beim Einfügen neuer Bausteine.



HANSWALTER ZENTGRAF, DKFZ, HEIDELBERG

▲ Das HI-Virus – rechts in der elektronenmikroskopischen Aufnahme zu sehen – lässt sich nur mit einem Cocktail aus verschiedenen Wirkstoffen länger in Schach halten. Doch selbst dann treten Resistenzvarianten auf und die vorhandenen Medikamente werden machtlos.

Hemmstoffe der Protease hingegen verhindern zwar nicht die Infektion der Zelle, wohl aber das Entstehen neuer infektiöser Viruspartikel. Die Pharmaka ähneln den Schnittstellen, an denen die Schere der Protease angreift, um die Vorläuferproteine in funktionsfähige Einzelkomponenten zu zerlegen. Wie ein Keil blockieren die Medikamente die Schneiden der molekularen Schere. Neu entstandene Partikel können – da sie nun unreif bleiben – keine weiteren Zellen mehr befallen.

Die Hemmstoffe beider Klassen können die Virusmenge im Blut infizierter Menschen über längere Zeit drastisch verringern, sodass zeitweise gar keine Viruspartikel mehr nachweisbar sind. Der Gesundheitszustand der Patienten verbessert sich meist deutlich. Trotzdem sind die Medikamente keine Heilmittel im Wortsinn, denn sie unterdrücken lediglich die Vermehrung von HIV, befreien jedoch nicht vom Erreger. Denn ist dessen Erbinformation erst einmal in das Zellgenom eingebaut, so kann auch die beste HIV-Therapie dies nicht rückgängig machen. Wirkliche Heilung hieße dagegen: Keine Zelle im Körper trägt mehr das HIV-Genom in ihrem Inneren. ▷

Vermehrungsstrategie von HIV

1. Andocken des Virus und Fusion der Virushülle mit der Zellmembran; Bindungshemmer, Fusionshemmer

2. Übersetzen der einzelsträngigen Virus-RNA in doppelsträngige DNA; RT-Inhibitoren

3. Einbau der viralen DNA in das Genom der Zelle; Integrase-Hemmer

4. Übersetzung der Virusgene in Boten-RNA

CD4-Rezeptor
Corezeptor
Hüllproteine
gp120
gp41
Reverse Transkriptase
Integrase
Virus-RNA
Virus-RNA (Einzelstrang)
Virus-DNA (Doppelstrang)
integrierte Virus-DNA

Der mittlerweile gut erforschte Infektionszyklus des Erregers bietet viele Angriffspunkte für die Therapie. Breiten Einsatz finden derzeit vor allem Hemmstoffe der Reversen Transkriptase, die das RNA-Genom in lesbare DNA übersetzt, sowie der Protease, die zur Reifung der neuen Viruspartikel beiträgt.

Zunächst gingen die Wissenschaftler davon aus, dass bei entsprechender Therapie die verbleibenden infizierten Zellen innerhalb weniger Jahre durch den natürlichen Zelltod von selbst verschwinden würden. Heute wissen wir, dass einige dieser Zellen sehr lange im Körper überleben und jederzeit zur Produktion neuer Partikel in der Lage sind. Und nicht nur das: Die Erbinformation des Virus wird außerdem bei jeder Zellteilung an beide Tochterzellen weitergegeben. Wird die Therapie abgebrochen, breitet sich der Erreger von diesen Reservoirs erneut aus. Daher muss die Behandlung vermutlich lebenslang durchgeführt werden.

Evolution im Zeitraffer

Ob aber eine Dauertherapie überhaupt machbar ist, kann derzeit niemand mit Sicherheit sagen. Die verfügbaren Medikamente haben starke Nebenwirkungen, die von Kopfschmerzen, Ausschlägen, Erbrechen und Durchfall bis zu Störungen der Leberfunktion und des Nervensystems reichen. Bei der Kombination mehrerer Medikamente kommt es oft zu einer so genannten Lipodystrophie. Diese Umverteilung des Körperfetts ist sehr auffällig und belastet die Patienten daher stark. Viele Menschen haben zudem keinen Zugang zu den Medikamenten – vor allem in den besonders betroffenen ärmeren Ländern in Afrika und Asien (siehe Kasten S. 40). Diese Probleme scheinen aber zumindest teilweise lösbar. Mehr Kopfzerbrechen bereitet etwas anderes: das Auftreten resistenter Viren, die den passgenau entwickelten Medikamenten entkommen können.

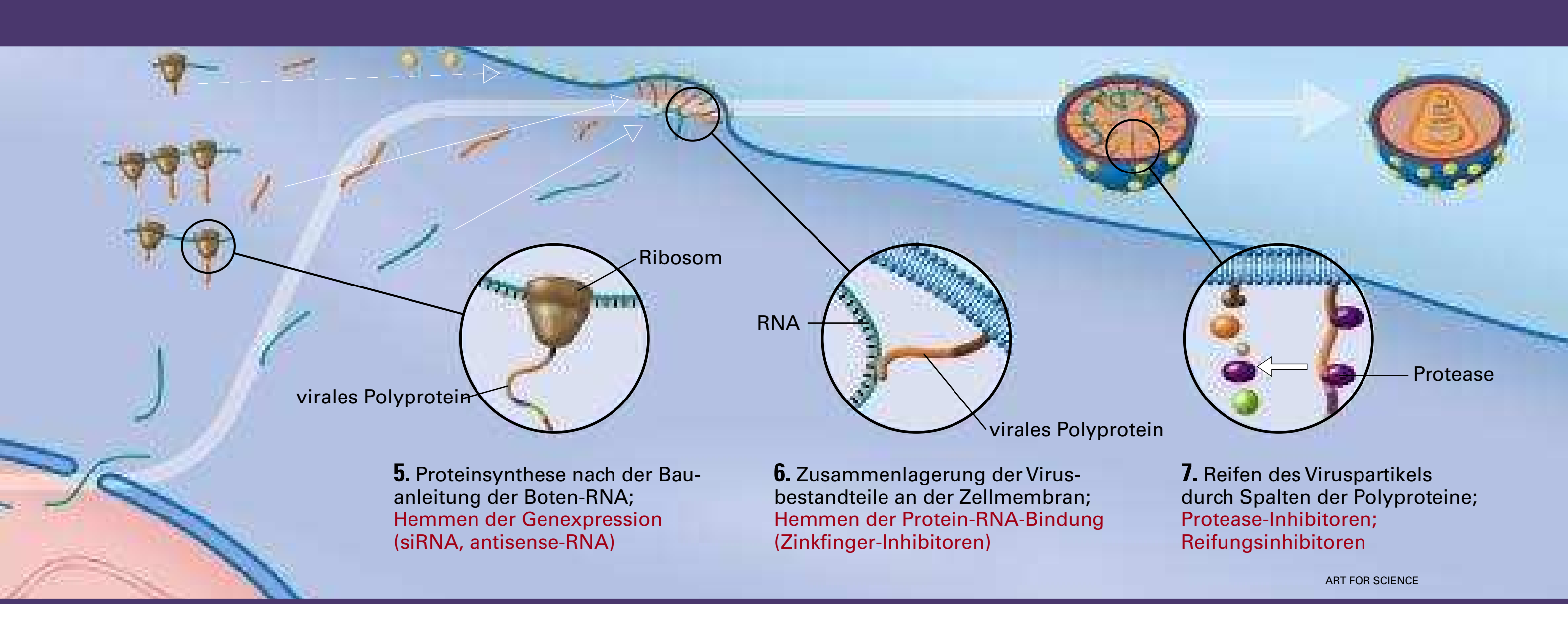
Bei der Resistenzentwicklung von HIV beobachten wir eine Art »Evolution im Zeitraffer«. Das Virus vermehrt sich nicht nur sehr schnell, sondern darüber hinaus auch äußerst fehlerhaft. Schuld daran ist die Reverse Transkriptase: Sie macht »Tippfehler« beim Umschreiben des Virusgenoms in DNA. In der neuen Kopie des genetischen Textes ist daher im Durchschnitt einer von insgesamt rund 10 000 Buchstaben – sprich DNA-Bausteinen – falsch. Bereits bei 10 000 Virusnachkommen könnte also jeder Baustein gegenüber dem Original einmal verändert sein. Nach einer Schätzung aus dem Jahr 1996 entstehen bei jedem unbehandelten Patienten Tag für Tag ungefähr 10 Milliarden neuer Viren. Statistisch gesehen treten also an jeder beliebigen Stelle des Virusgenoms täglich mehrfach Mutationen auf. Mehr noch: Die Erbinformation zweier Virusvarianten kann miteinander kombiniert werden, wenn sich beide gleichzeitig in derselben Zelle befinden. Das steigert die Möglichkeiten des Virus, sich anzupassen, noch weiter.

Auch wenn viele der neuen Mutanten nicht überlebensfähig sind, entsteht doch binnen kürzester Zeit ein vielfältiges Gemisch von Virusvarianten, eine so genannte Quasispezies. Einige Mitglieder weisen zufällig eine gewisse Resistenz gegen eines der verfügbaren Medikamente auf. Normalerweise sind solche Varianten stark in der Minderheit, da sie sich schlechter vermehren. Infolge einer Behandlung mit einem entsprechenden Wirkstoff entsteht ihnen aber ein Vorteil, weil konkurrierende Viren ausgeschaltet werden. Durch weitere zufällige Mutationen passen sich die zunächst schwach resistenten Viren zunehmend an die veränderten Bedingungen an und gewinnen rasch die Oberhand.

Bremse für widerstandsfähige Viren

Bei dieser schrittweisen Veränderung können komplexe und schwer vorhersagbare Resistenzeigenschaften entstehen. Im günstigsten Fall kann die Ausbildung einer zweiten Resistenz sogar mit dem Verlust der ersten einhergehen. Dieses Phänomen wurde bei AZT-resistenten Viren beobachtet: Erwerben sie durch zusätzliche Veränderungen der Reversen Transkriptase eine Widerstandsfähigkeit gegen den Hemmstoff 3TC, werden sie gleichzeitig wieder für AZT empfindlich. Damit steht das zwischenzeitlich bei diesem Patienten wirkungslose Medikament erneut für die Behandlung zur Verfügung.

Resistenzentwicklung ist kein neues Problem. Sie tritt bei jeder wirksamen anti-infektiösen Therapie auf und hat



5. Proteinsynthese nach der Bauanleitung der Boten-RNA; Hemmen der Genexpression (siRNA, antisense-RNA)

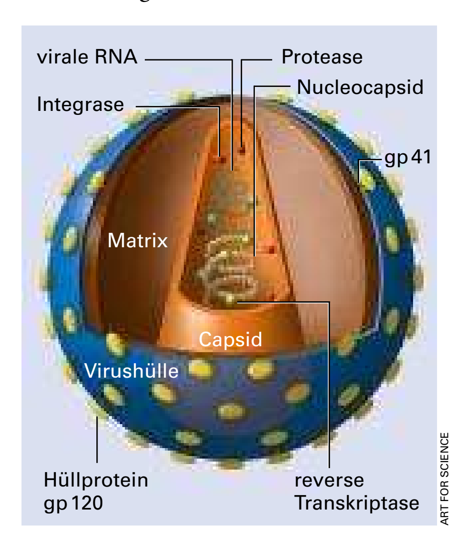
6. Zusammenlagerung der Virusbestandteile an der Zellmembran; Hemmen der Protein-RNA-Bindung (Zinkfinger-Inhibitoren)

7. Reifen des Viruspartikels durch Spalten der Polyproteine; Protease-Inhibitoren; Reifungsinhibitoren

beispielsweise in vielen Fällen die einstige Wunderwaffe Antibiotika stumpf werden lassen. Erfahrungen mit Krankheiten wie der Tuberkulose haben gezeigt, dass eine Kombination von unterschiedlichen Wirkstoffen sinnvoll sein kann, um die Resistenzentwicklung gegen ein Medikament zu erschweren. Auch für die HIV-Therapie bedeutete diese Strategie einen Durchbruch. In westlichen Ländern ist heute eine intensive Behandlung mit einer Kombination aus mehreren Wirkstoffen längst Standard: Bei der »hochaktiven antiretroviralen Therapie«, kurz HAART genannt, werden drei oder mehr Medikamente eingesetzt, die unterschiedliche Schwachstellen des Virus angreifen. Bei fast allen Patienten verringert dieses Vorgehen die so genannte Viruslast im Blut sowie die klinischen Symptome. Leider ist HIV sogar dieser Strategie gewachsen, und zunehmend treten inzwischen Varianten auf, die gegen mehr als einen Wirkstoff Widerstand leisten.

Resistente HIV-Varianten können natürlich auch übertragen werden. Wer sich damit ansteckt, hat dann von Anfang an weniger therapeutische Optionen. Eine Studie aus dem Jahr 2003 ergab, dass bereits jede zehnte Neuinfektion in Europa mit resistenten Virusvarianten erfolgte. Jeder fünfzigste Patient hatte sich sogar mit den gefürchteten mehrfach resistenten Varianten infiziert. In den USA geschieht dies noch weitaus häufiger, und leider werden auch bei uns die Zahlen in den nächsten Jahren weiter ansteigen.

Um im Wettlauf mit HIV die Oberhand zu behalten, müssen wir nicht nur das Auftreten resistenter Viren in jedem einzelnen Patienten genau beobachten, sondern auch deren Verbreitung auf nationaler und internationaler Ebene verfolgen (siehe Kasten S. 39). Darüber hinaus gilt es, die molekularen Mechanismen zu erforschen, die der Widerstandsfähigkeit gegenüber antiviralen Agenzien zu Grunde liegen. Nur mit diesem Wissen ist es möglich, optimierte Therapiepläne für den Einzelnen zu erstellen sowie verbesserte Präparate und Wirkstoffkombinationen zu entwickeln, die im Kampf gegen HIV lange effektiv bleiben. Bislang lässt sich das Virus immer nur eine gewisse Zeit in Schach halten. Aus diesem Grund ist es unumgänglich, ständig nach neuen Pharmaka zu suchen, die genau dort greifen, wo bereits Resistenzen bestehen.



Die Virusbestandteile fügen sich zu kleinen Partikeln von etwa 140 Nanometer Durchmesser zusammen.

Ein wichtiger Schritt ist, bereits bekannte Hemmstoffe zu optimieren. So entwickeln Wissenschaftler RT-Inhibitoren, die besser aufgenommen werden, geringere Nebenwirkungen aufweisen oder gegen resistente Viren helfen. Hierzu zählt das kürzlich für die therapeutische Anwendung zugelassene Medikament Emtricitabin: Der Wirkstoff bleibt deutlich länger als die übrigen Hemmstoffe dieser Klasse im Blut der Patienten erhalten und muss deshalb nur einmal täglich eingenommen werden. Allerdings hilft Emtricitabin nicht, wenn bereits eine Resistenz gegen Lamivudin besteht, einen anderen häufig eingesetzten nukleosidischen RT-Inhibitor.

Als besonders viel versprechend im Kampf gegen resistente Varianten gilt die Substanz TMC-125. Sie gehört zur Klasse der nicht nukleosidischen RT-Inhibitoren und passt sich durch besondere Flexibilität besser an veränderte Bindungsstellen resistenter RT-Enzyme an. Laufende klinische Studien mit TMC-125 lassen hoffen: Bei den behandelten Patienten sank die Viruslast deutlich ab. Nun gilt es, in weiteren Studien die geeignete Dosis zu ermitteln, bevor der Wirkstoff als Medikament zugelassen werden kann.

Auch gegen die HIV-Protease wurden weitere Hemmstoffe entwickelt. Dazu gehören Pharmaka mit geringeren Nebenwirkungen und verbessertem Resistenzprofil wie Atazanavir, das in den USA bereits zur therapeutischen Anwen- ▷

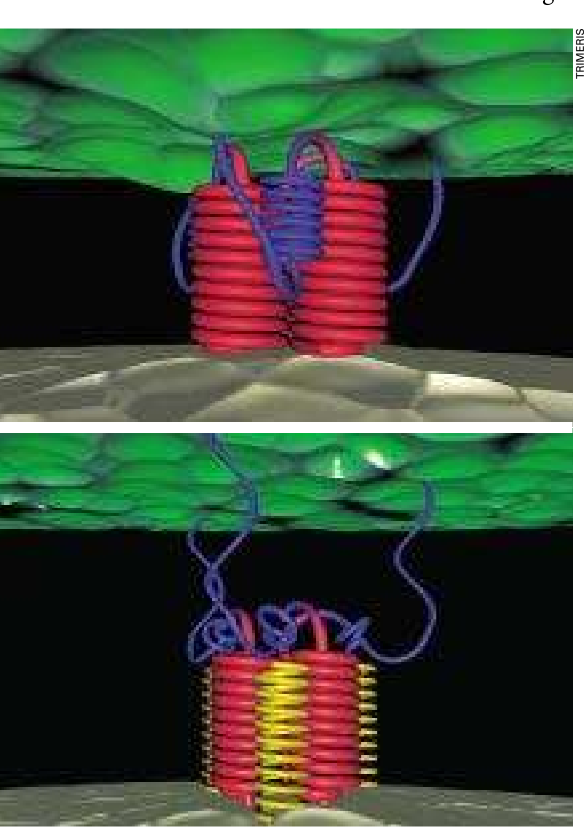
dung zugelassen ist und auch in Europa demnächst verfügbar sein wird. Besonders interessant ist in dieser Hinsicht eine Innovation mit dem Namen Tipranavir: Diese Substanz gehört einer neuen Wirkstoffklasse an, die sich in der chemischen Struktur deutlich von den verfügbaren Protease-Hemmern unterscheidet. Sie ist flexibler und passt sich der »Schneideöffnung« der Proteinschere an. In Testsystemen wirkt Tipranavir selbst bei solchen Virusvarianten gut, die gegen alle übrigen Protease-Inhibitoren bereits resistent sind. Wie gut der Hemmstoff bei Patienten hilft, wird derzeit geprüft. Eine weitere Substanz namens TMC114 soll über eine ähnliche Flexibilität verfügen. Auch sie wird bereits in Patientenstudien getestet.

Versperrter Eingang

Wichtig ist aber auch die Suche nach neuen Wirkstoffen, die das Virus von einer ganz anderen Seite attackieren. Eine Erfolg versprechende Strategie richtet sich gegen sein Eindringen in die Zielzelle. Dieser Prozess verläuft in drei Schritten, und jeder bietet einen Angriffspunkt, um den Erreger an der Türschwelle zur Zelle aufzuhalten. Zuerst heftet sich das virale Hüllprotein gp120 an den CD4-Rezeptor auf der Zelloberfläche. Anschließend dockt HIV an einen so genannten Korezeptor an, für den verschiedene Zellproteine – allen voran CCR5 und CXCR4 – in Frage kommen. Dadurch wird sozusagen die Tür zur Zelle aufgeschlossen. Schließlich öffnet das Umlagern eines anderen Hüllproteins von HIV, gp41, die Pforte: Ein ursprünglich gestreckter Teil dieses Eiweißmoleküls klappt scharnierartig zusammen, sodass Virushülle und Zellmembran zueinander hingezogen werden.

Dieser letzte Schritt vor dem Verschmelzen lässt sich durch einen Wirkstoff namens Enfuvirtide blockieren, der auch unter dem Kürzel T-20 bekannt ist. Er wurde 2003 als Medikament zugelassen. Bei Fusionsinhibitoren handelt es sich um Peptide, kleine »Proteinschnipsel«, die einen Abschnitt aus dem viralen Hüllprotein gp41 nachahmen und sich wie ein blockierender Keil in das Scharnier einfügen. Virus und Wirtszelle werden dadurch auf Abstand gehalten und ihre Membranen können nicht verschmelzen. Anfangs glaubte die Fachwelt, dieser Ansatz sei weit gehend vor Resistenzentwicklungen sicher, da das Peptid wichtige natürliche Strukturen im viralen Hüllprotein imitiert. Man ging daher davon aus, dass jede Mutation, die das Binden des Inhibitors beeinträchtigt, gleichzeitig die für den Viruseintritt notwendige Umlagerung von gp41 erschwert. Doch die Hoffnung trog: Im Serum von Patienten tauchten bereits nach kurzer Behandlung resistente Viren auf. Selbst dieser neue Medikamententyp eignet sich somit nur in Kombination mit anderen Wirkstoffen.

Auch auf die anderen Schritte des Viruseintritts zielen Inhibitionsstrategien ab. Zunächst schien das Anheften des Virus an den CD4-Rezeptor auf der Zelle der attraktivste Angriffspunkt zu sein. Wissenschaftler durchmusterten eine Vielzahl von Wirkstoffen, von denen keiner direkt brauchbar war. Weiterentwicklungen führten schließlich zu einem Hemmstoff namens PRO 452, dessen Verträglichkeit derzeit in ersten klinischen Studien getestet wird. Wissenschaftler befürchten aber bei dieser Strategie eine besonders schnelle Resistenzentwicklung, da sich die Substanz an das äußerst variable Hüllprotein von HIV heftet. So zeigte sich bereits in Zellkulturexperimenten, dass PRO 452 nur bei einem Teil der bekannten HIV-Stämme greift.



TRIMERIS

Wie ein Keil schiebt sich der gelb gezeichnete Fusionsinhibitor Enfuvirtide zwischen die beiden Untereinheiten des Hüllproteins gp41. Es blockiert so das Scharnier und verhindert, dass Virus und Wirtzelle – wie im oberen Bild dargestellt – zueinander gezogen werden und ihre Membranen verschmelzen.

Von der Genvariation zum möglichen Hemmstoff

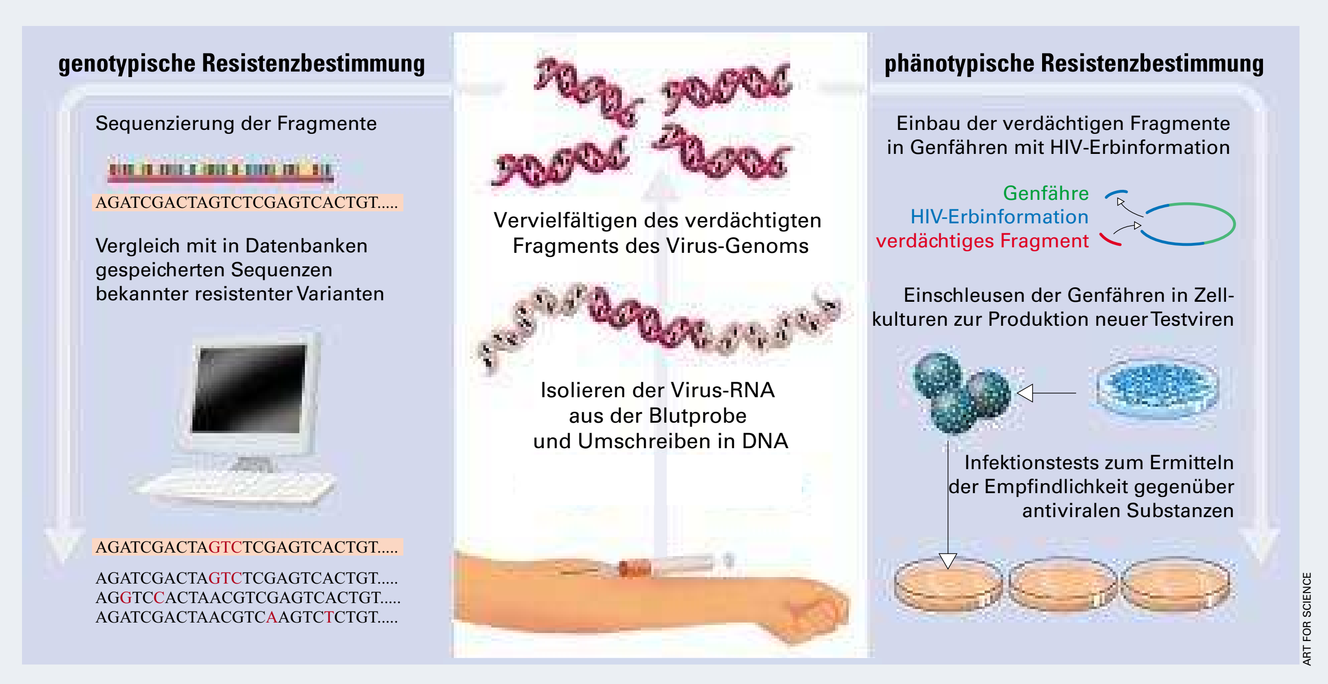
Wesentlich Erfolg versprechender erscheint daher das Blockieren der verschiedenen HIV-Korezeptoren – allen voran des Moleküls CCR5. Schließlich ist bei Molekülen des menschlichen Organismus keine derartige schnelle Veränderung zu erwarten, wie man sie von HIV kennt. Die Idee entstand aus der Beobachtung, dass ungefähr einer unter hundert Menschen auf Grund einer natürlichen Erbvariation kein CCR5-Molekül besitzt. Fehlt es, ist die Wahrscheinlichkeit einer HIV-Infektion außerordentlich gering. Da das Fehlen des Rezeptors sich offensichtlich nicht negativ auswirkt, sollte auch seine therapeutische Blockade keine schwer wiegenden Nebenwirkungen nach sich ziehen. Einige Pharmaka dieser Art werden bereits bei freiwilligen Patienten getestet. Doch auch diese Strategie ist nicht gegen Resistenzbildung gefeit. Die Inhibitoren wirken nur gegen HIV-Stämme, die CCR5 und nicht den alternativen Korezeptor CXCR4 nutzen. Wissenschaftler befürchten daher, dass das Blockieren des CCR5-Rezeptors HIV-Varianten begünstigt, welche die alternative Eintrittspforte nutzen.

Nach Hemmstoffen der CXCR4-Bindung wird ebenfalls geforscht. Die bislang am besten untersuchte Substanz AMD-3100 zeigte jedoch in der klinischen Prüfung Nebenwirkungen auf das Herz und kommt daher für die therapeutische Anwendung nicht in Frage.

Neben dem Viruseintritt gilt der Einbau des HIV-Genoms in die Zell-DNA als ein weiterer interessanter Angriffspunkt. Die Suche nach geeigneten Hemmstoffen im Modellsystem erwies sich jedoch als äußerst schwierig. Das präzise, koordinierte Einfügen beider Enden der viralen DNA in ein Chromosom ist eine sehr komplizierte Reaktion, die sich zunächst nur unzureichend im Reagenzglas nachstellen ließ. Dieses Prob-

Resistenzen sichtbar machen

Die Entwicklung von Resistenzen ist ein äußerst wichtiger Faktor, den es bei der HIV-Therapie zu berücksichtigen gilt. Leider haben die existierenden Methoden zum Nachweis von Resistenzmutationen einige Schwachpunkte. Daher besteht ein großer Bedarf an schnellen, einfachen und kostengünstigen Verfahren, die möglichst auch seltenere Varianten in einem Gemisch verschiedener Viren erkennen und ihr Ansprechen auf bestimmte Medikamente zuverlässig vorhersagen.



Der genotypische Resistenztest (linke Spalte der Grafik) ist die derzeit gängige Methode. Hier wird das virale Erbgut aus dem Blut des Patienten isoliert und untersucht. Man vervielfältigt ein Stück des Virusgenoms und bestimmt die Abfolge seiner Bausteine, die Sequenz. Ein Vergleich mit Datenbanken, in denen Virusvarianten gespeichert sind, erlaubt im Idealfall vorhandene Resistenzen zu erkennen. Der Test dauert nur wenige Tage und ist gut standardisiert. Neue Resistenzvarianten sind damit allerdings nicht zu erkennen. Außerdem nimmt die Qualität der Vorhersage mit der Zahl an gleichzeitigen Mutationen ab. Trotz seiner Nachteile ist der genotypische Resistenztest wichtiger Bestandteil der Therapiesteuerung. Leider wird er nur nach Einzelantrag von den Krankenkassen bezahlt, obwohl sich durch die Untersuchung sogar die Kosten der teuren HAART-Therapie senken ließen.

Der phänotypische Resistenztest (rechte Spalte der Grafik) ist geeignet um komplexe Resistenzmuster zu erkennen sowie bisher unbekannte Resistenzmutationen – etwa gegen neue Medikamente. Hierfür werden Testviren hergestellt, die den Abschnitt des Virusgenoms enthalten, der unter Verdacht steht, Resistenzen zu verursachen. Anschließend untersucht man, ob sich diese Viren in Anwesenheit verschiedener HIV-Medikamente vermehren. Diese Methode ist kostenintensiv und zeitaufwändig – zwischen Blutabnahme und Testergebnis liegen mindestens zwei Wochen. Außerdem erfordert sie ein spezielles gentechnisches Sicherheitslabor der Stufe 3, weswegen das Verfahren Speziallabors vorbehalten bleibt. Seltene Resistenzvarianten können immer noch übersehen werden.

In dem von der Landesstiftung Baden-Württemberg geförderten Netzwerk »Resistenzentwicklung humanpathogener Erreger« entwickeln wir derzeit neue Verfahren. Wir benutzen beispielsweise kleine Indikator-Proteinschnipsel, die von der HIV-Protease zerschnitten werden. Tut sie das nach Zugabe einzelner Inhibitoren immer noch, liegt eine Resistenz gegen den entsprechenden Hemmstoff vor. Weitere Verfahren entwickeln wir – gemeinsam mit Partnern aus Frankreich, Holland, Portugal und der Tschechischen Republik – in einem von der europäischen Gemeinschaft geförderten Projekt.

lem ist mittlerweile zwar gelöst, doch sind bisher erst wenige in Zellkultur wirksame Integrase-Inhibitoren bekannt. Eine erste klinische Studie mit einem solchen Wirkstoff wurde im vergangenen Jahr abgebrochen. Einige weitere Substanzen werden bei Tieren getestet.

Andere Wirkstoffe stecken erst im experimentellen Stadium ihrer Entwicklung, etwa die so genannten »Zinkfinger-Inhibitoren«. Als Zinkfinger-Motive bezeichnet man spezielle Strukturen, etwa von zelleigenen Proteinen, die bei der Genregulation eine Rolle spielen. Solche Bereiche trägt auch ein HIV-Protein, das für die Verpackung der neu hergestellten viralen Erbsubstanz zuständig ist. Ein Blockieren der »Finger« hätte zur Folge, dass neue Virus-RNA nicht mehr »gegriffen« und in Partikel gepackt wird. Leider beeinträchtigen die Hemmstoffe auch zelleigene Zinkfinger-Proteine, weshalb mit gravierenden Nebenwirkungen zu rechnen war. Eine erste klinische Studie mit der Substanz ADA bestätigte diese Befürchtung bereits. Auch bestehen Zweifel an der Wirksamkeit dieser Strategie. ▷

Therapie für Afrika

Neue HIV-Therapien machen es möglich, den Krankheitsausbruch um viele Jahre hinauszuzögern – zumindest bei Patienten in Europa und Nordamerika. Ganz anders sieht es jedoch in der restlichen Welt aus. Dabei leiden gerade die ärmeren Länder – allen voran in Afrika – besonders unter der Seuche: In den am stärksten betroffenen Gebieten sind bis zu 40 Prozent der Erwachsenen mit HIV infiziert. Und in eben diesen Regionen steht derzeit in der Regel keinerlei Therapie zur Verfügung.

Ein großes Problem stellen die hohen Kosten der Medikamente dar, ebenso wie die insgesamt unzureichende Gesundheitsversorgung. Gerade die Kostenfrage wird in der Öffentlichkeit intensiv diskutiert, wodurch Pharmakonzerne unter zunehmenden Druck geraten sind, Medikamente für arme Länder zu stark verringerten Preisen anzubieten. Therapiekosten zu finanzieren, ist auch eines der wesentlichen Ziele zahlreicher internationaler Initiativen, etwa des Global Fund zur Bekämpfung von Aids, Tuberkulose und Malaria.


DENIS MANGA TEBIT, VIROLOGIE UNIVERSITÄT HEIDELBERG

Schwangere erhalten in Nouna (Burkina Faso) kostenlose HIV-Tests und werden medizinisch betreut, um die Übertragung von der Mutter auf das Kind zu verhindern.

Doch Geld ist nicht das einzige Hindernis für die Aids-Therapie in ärmeren Ländern. Bevor überhaupt mit einer Behandlung begonnen werden kann, muss die Bereitschaft, sich einem HIV-Test zu unterziehen, geweckt werden. Wie kompliziert der Weg dahin ist, haben wir im Krankenhaus von Nouna (Burkina Faso) immer wieder selbst erfahren. Dort wollen wir – in einem Projekt der afrikanischen Entwicklungsbank und der deutschen Forschungsgemeinschaft – die Mutter-Kind-Übertragung von HIV verhindern.

Zunächst ist es unabdingbar, Meinungsbildner – etwa Stammesälteste, Heiler und religiöse Führer – von der Notwendigkeit der Untersuchung zu überzeugen. Eine große Bedeutung haben auch lokale Organisationen wie Frauengruppen, deren Mithilfe dringend benötigt wird. Regierungen und Gesundheitsbehörden müssen die Aids-Tests zur Priorität erklären und eine Infrastruktur zur Beratung und Durchführung schaffen. Gleichzeitig ist es aber auch wichtig, den Test und die spätere Behandlung vertraulich anzubieten, um die Situation der Betroffenen nicht durch Stigmatisierung zu verschlimmern.

Ist der Weg zur Therapie schließlich gebahnt, gilt es eine langfristige Versorgung mit Medikamenten zu sichern. Ausgebildetes Personal muss die Patienten über die Bedeutung einer konsequenten Einnahme der Medikamente aufklären. Bei der Therapieplanung darf die Gefahr von Resistenzentwicklungen nicht außer Acht gelassen werden. Als warnendes Beispiel sei die Situation bei Malaria genannt. Gegen diese Infektionskrankheit steht mit Chloroquin ein preiswertes Medikament zur Verfügung. Es ist jedoch mittlerweile weit gehend nutzlos, weil die breite, unkontrollierte Anwendung zu einer starken Verbreitung der Chloroquin-Resistenz beim Malaria-Erreger geführt hat. Um eine vergleichbare Entwicklung im Fall von HIV zu vermeiden, gilt es die Medikamente nicht wahllos zu verteilen, sondern ihre Anwendung sorgfältig zu planen. Hierzu ist die Kooperation westlicher Forschungsgruppen und Ärzte mit Kliniken und Therapiezentren vor Ort notwendig. In enger Zusammenarbeit müssen die notwendigen Voraussetzungen geschaffen werden, um die Behandlungsstrategien an die gesellschaftlichen Zusammenhänge und die Bedürfnisse der Menschen in den betroffenen Regionen anzupassen. Begleitende Studien dienen dazu, den langfristigen Erfolg zu erfassen und zu verbessern.

Zahlreiche Vertreterinnen von Frauengruppen kamen zur Eröffnung der neuen Entbindungsstation in Nouna. Ohne ihre Unterstützung wäre das Projekt zur Betreuung von HIV-positiven Schwangeren kaum denkbar.


DENIS MANGA TEBIT, VIROLOGIE, UNIVERSITÄT HEIDELBERG

Beispielhaft ist die Entwicklung in Botswana, einem der Länder mit der höchsten HIV-Rate. Dort ist seit Anfang 2003 die Therapie aller behandlungsbedürftigen Patienten Teil des nationalen Gesundheitsprogramms. Studien sollen zeigen, welche Wirkstoffkombination am besten für den Therapiebeginn beziehungsweise als Alternative bei Resistenz geeignet ist. Auch wenn eine allgemeine Behandlung derzeit nur in Ländern mit vergleichsweise guten wirtschaftlichen Voraussetzungen möglich ist, muss der in Botswana eingeschlagene Weg zumindest zum Vorbild werden. Der breite Einsatz der HIV-Therapie im Rahmen organisierter Schemata ist überlebensnotwendig für die am stärksten betroffenen Länder und bietet darüber hinaus eine Chance, die Epidemie in anderen Regionen einzudämmen.

▷ Auch ein neuartiger Inhibitor der Virusreifung befindet sich in der experimentellen Entwicklung. Anders als Protease-Inhibitoren hemmt PA-457 nicht das Zerschneiden der Strukturproteine, sondern heftet sich daran. Dadurch verhindert der Wirkstoff das Umlagern der Strukturproteine zum reifen Viruspartikel. Wann die Substanz erstmals bei HIV-Patienten getestet wird, ist jedoch noch nicht abzusehen.

Hoffnung Gentherapie?

Alle bislang beschriebenen Ansätze stammen aus dem Bereich der klassischen Arzneimitteltherapie, die sich – meist mit Hilfe einer niedermolekularen, chemisch synthetisierten Substanz – gegen ein Zielprotein richtet. Doch auch neuere und bisher wenig erprobte Therapieansätze wie Gen- oder Immuntherapie könnten beim Kampf gegen Aids helfen. Selbstverständlich erfordern die Risiken, die mit der Gentherapie verbunden sind, ein sorgfältiges Abwägen. Im Hinblick auf den tödlichen Verlauf einer unbehandelten HIV-Infektion sollten gentherapeutische Ansätze dennoch in Betracht gezogen werden.

Denkbar ist zum Beispiel, eine Art intrazelluläre Impfung zu bewirken. Man entnehme dem Patienten zunächst potenzielle Zielzellen und bringe sie dann durch Einschleusen bestimmter Gene dazu, virushemmende Nukleinsäuren oder Proteine zum eigenen Schutz zu bilden. Die große Hoffnung ist, dass die so gerüsteten Zellen – einmal in den Körper zurückgegeben – sich vermehren und das Immunsystem des Erkrankten wiederherstellen. In experimentellen Systemen haben Forscher verschiedene Proteine identifiziert, die eine Zelle vor HIV schützen können. Ein Beispiel ist der erwähnte Hemmstoff Enfuvirtide: Statt die chemisch hergestellten Proteinschnipsel zu injizieren, ist es denkbar, die entsprechende Erbinformation für ihren Aufbau in Zellen einzubringen, damit diese selbst den Inhibitor produzieren. Dass die Strategie prinzipiell funktioniert, wurde an Zellkulturen demonstriert. Erste Studien an Patienten stehen bevor.

Ein Schutz innerhalb der Zelle lässt sich auch mit Hilfe von hemmenden RNA-Molekülen erreichen. Die so genannte siRNA (von *short interfering RNA*, kurze interferierende RNA-Stücke) bewirkt beispielsweise den Abbau jeder Boten-RNA, die ihrer eigenen Sequenz entspricht. Da Boten-RNA bei der Proteinherstellung als Arbeitskopie von Genen entsteht, lässt sich mit passgenauer, künstlich hergestellter siRNA gezielt jedes Gen in der Zelle abschalten – so auch die von Viren. Das Prinzip haben Wissenschaftler den Pflanzen abgeschaut, die solche siRNAs zur Abwehr von Viren einsetzen. Es liegt nahe, mit derselben Strategie auch HIV zu bekämpfen.

In experimentellen Systemen konnten Forscher auf diese Weise bereits die Virusvermehrung deutlich hemmen. Die klinische Anwendung steckt jedoch wie bei jeder Form der Gentherapie noch in den Kinderschuhen. Besondere Schwierigkeiten bereitet dabei, die therapeutischen Moleküle gezielt und effektiv in die gewünschten Zellen zu schleusen. Auch ist bei RNA-basierten Methoden zu befürchten, dass Resistenzen auftreten. Denn die Hemmwirkung beruht auf der exakten Entsprechung von Inhibitor und Ziel-RNA, weshalb das Virus durch Mutation entkommen kann.

Unterstützung der natürlichen Immunantwort

Wie aber steht es nun um die Möglichkeiten der Immuntherapie HIV-Infizierter? Ein Impfstoff, der gesunde Menschen vor einer HIV-Infektion schützen kann, ist – wie bereits erwähnt – derzeit nicht in Sicht.

So waren geimpfte Affen nicht – wie ursprünglich erhofft – vor einer Infektion geschützt. Doch die Krankheit verlief deutlich langsamer. Sollte dies auch bei Impfung nach vorheriger HIV-Infektion der Fall sein, könnte diese in Zukunft die Behandlung mit Medikamenten unterstützen. Verschiedene Impfstoffe kommen für die so genannte therapeutische Immunisierung in Betracht: HIV-Bestandteile, Impfviren – also unschädliche Viren, die als Träger für ein HIV-Protein agieren – und sogar DNA-Vakzine, bei denen lediglich die Erbinformation für ein Virusprotein als Impfstoff dient. Entsprechende Studien sind in naher Zukunft zu erwarten. Die Stimulation von Immunzellen empfiehlt sich allerdings nur bei gleichzeitiger Gabe von virushemmenden Medikamenten, da aus den aktivierten Immunzellen vermehrt Viren freigesetzt werden.

Gleiches gilt auch für eine allgemeine Stimulation des Immunsystems durch Botenstoffe wie Interleukin 2. Sie sollen das geschädigte Immunsystem beim Kampf gegen das Virus unterstützen. Gleichzeitig besteht der Hintergedanke, durch Anregen von latent infizierten Zellen, die darin schlummernden Viren aus ihrem Versteck zu locken und angreifbar zu machen. In bisherigen Studien besserte sich der Gesundheitszustand der Patienten jedoch nicht – trotz messbarem Anstieg der Immunzellen.

Ein Wundermittel gegen Aids ist also nicht in Sicht und wird wohl nie gefunden werden. Trotz vielfältiger experimenteller Ansätze bleiben antivirale Medikamente in absehbarer Zukunft die einzig realistische Möglichkeit, der Aids-Pandemie zu begegnen. Dass dies sehr erfolgreich sein kann, belegt die in den letzten zehn Jahren drastisch gesunkene Zahl der Aids-Toten in den USA und Westeuropa. Jetzt ist es dringend geboten, der weltweiten Herausforderung zu begegnen und eine wirksame und dauerhafte Therapie in allen Regionen der Welt zu ermöglichen. Die Betonung liegt auf wirksam und dauerhaft, denn in den letzten Jahren haben wir vor allem eines gelernt: Wir dürfen uns keinen Moment auf unseren Erfolgen ausruhen, da jede Therapie auch Resistenzen auslöst. Diese Entwicklung kann nur verlangsamt werden, wenn wir mit den verfügbaren Ressourcen verantwortungsvoll umgehen. Jede unzureichende Therapie oder unregelmäßige Medikamenteneinnahme verschlechtert nicht nur die Behandlungsmöglichkeit für den einzelnen Patienten, sondern gefährdet das einsetzbare therapeutische Arsenal insgesamt. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



Die Biologin **Barbara Müller** habilitiert sich in der Abteilung von **Hans-Georg Kräusslich.** Dieser ist Professor für Virologie und Direktor der virologischen Abteilung der Universität Heidelberg. Er ist Sprecher des Kompetenznetzes »Resistenzentwicklung humanpathogener Erreger« eines EU-Projekts zur Resistenz gegen Protease-Inhibitoren sowie des Sonderforschungsbereichs »Kontrolle tropischer Infektionskrankheiten«.

Twenty years of therapy for HIV-1 infection. Von Roger J. Pomerantz und David L. Horn in: Nature medicine, Bd. 9, S. 867, Juli 2003.

The causes and consequences of HIV evolution. Von Rambaut A. et al. in: Nat Rev Genet., Bd. 5, S. 52, Januar 2004.

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Hörgeräte – Orientierung auf der Cocktailparty

Digitale Systeme simulieren immer mehr Fertigkeiten der akustischen Wahrnehmung.

Von Guido Reetz

Hören, das bedeutet Schallwellen in elektrische Signale umwandeln und diese auswerten. Dazu werden im menschlichen Hörapparat die Luftbewegungen über Trommelfell und Gehörknöchelchen auf die Basilarmembran des Innenohrs übertragen. Deren Vibrationen bewegen die Haare der inneren Haarzellen. Diese wiederum erzeugen Ionenströme und setzen Botenstoffe für die Weiterleitung durch den Hörnerv frei. Wird das komplexe System durch Krankheiten oder Alterungsprozesse stark gestört, sind die Folgen für den Betroffenen schwer wiegend, denn ein Großteil der menschlichen Kommunikation erfolgt durch Sprache.

Je nach Ursache der Behinderung erleichtern Hörgeräte das Los der Erkrankten. Analoge Geräte trennen das über ein Mikrofon aufgenommene akustische Signal meist nur in tiefe, mittlere und hohe Frequenzen und verstärken jeden dieser drei Kanäle für sich. Digitale Systeme – seit 1996 auf dem Markt – unterscheiden bis zu 22 Frequenzbänder, die sie separat analysieren und in der Lautstärke differenziert anheben. Zudem versuchen die Entwickler, die technischen Möglichkeiten auszuschöpfen, um ein »komfortables« Hören zu ermöglichen. So empfinden Schwerhörige laute Geräusche oft als besonders unangenehm, vermutlich infolge defekter äußerer Haarzellen. Normalerweise erweitern diese Strukturen den Dynamikbereich des Gehörs, indem sie starke Schwingungen der Basilarmembran dämpfen und schwache verstärken. Getrennt für jedes Frequenzband hebt eine individuell einstellbare Automatik deshalb leise Signale deutlich an und verstärkt laute nur wenig.

Hintergrundgeräusche sind ein weiteres Problem, da sie das Sprachsignal überlagern. Hörgeräte filtern deshalb im ersten Schritt Frequenzen unterhalb von 100 bis 200 Hertz (Hz) heraus, wie sie zum Beispiel Motoren erzeugen. Digitale Systeme suchen zudem in den verschiedenen Frequenzkanälen nach Sprachsignalen, beispielsweise anhand statistischer Eigenschaften, um dann Störungen durch Filter zu unterdrücken.

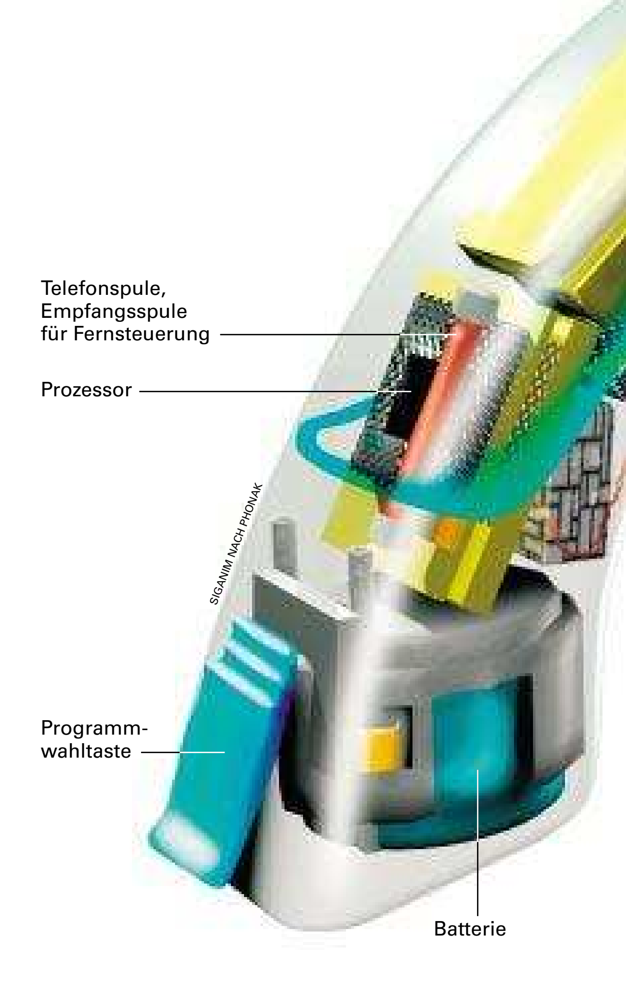
Selbst der Cocktailparty-Effekt lässt sich heute mit Hörgeräten erreichen. Der normal Hörende verfügt über ein Arsenal physiologischer Funktionen, um selbst bei hohem Geräuschpegel zu verstehen, was sein Gegenüber ihm erzählt. Kommt das Signal beispielsweise von links, die Störung aber von rechts, verarbeitet das Gehirn bevorzugt die Informationen des linken Ohrs (Kopfschatten-Effekt). Aber auch bei nur leichten Richtungsdifferenzen vermag das gesunde Gehör Signal und Rauschen gut zu differenzieren. Dies zu imitieren setzt eine Richtcharakteristik des Mikrofons voraus: Seine Empfindlichkeit ist nach vorn maximal, zur Seite aber gering (so genannte Nierencharakteristik).

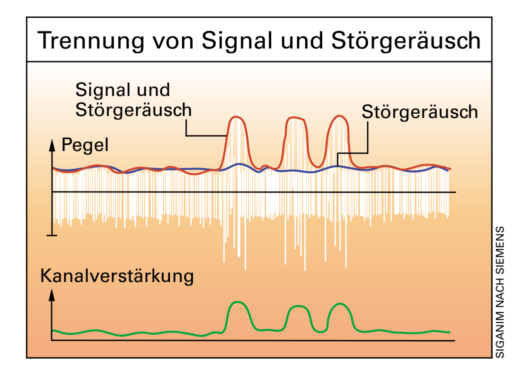
Digitale Hörgeräte arbeiten mit zwei bis drei Mikrofonen, die miteinander gekoppelt werden. Entdecken die Signalprozessoren kein Sprachsignal, empfängt das System aus allen Richtungen gleichermaßen. Ansonsten steuern sie die Mikrofone so, dass eine Richtcharakteristik entsteht und das Minimum der Empfindlichkeit zur Störquelle weist. Sogar eine sich bewegende Lärmquelle wie ein Auto lässt sich damit abdämpfen, ohne dass der Schwerhörige diesen Vorgang bemerkt. Leider stoßen die heutigen Spracherkennungsverfahren noch an Grenzen, sobald mehr als eine Person redet. ◁

Guido Reetz arbeitet bei MED-EL in Innsbruck, einem Hersteller von Cochlea-Implantaten.

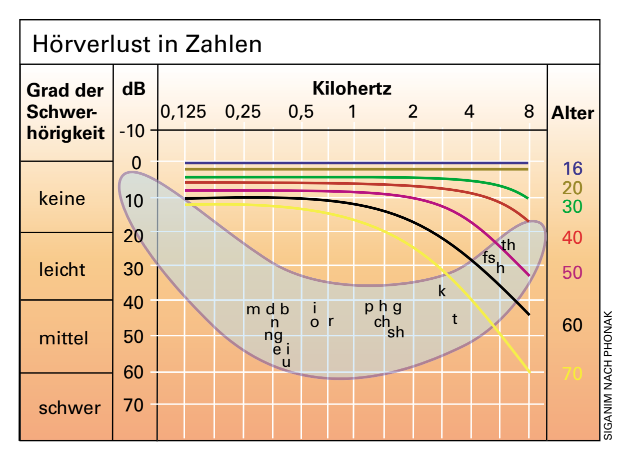
Programmwahlschalter
Batterie
Prozessor
Mikrofon
Lautsprecher
SIGANIM NACH PHONAK UND STARKEY

▲ Kleine Geräte im Gehörgang nutzen dessen Richtwirkung. Sie verstärken Schall um bis zu 40 Dezibel (dB).

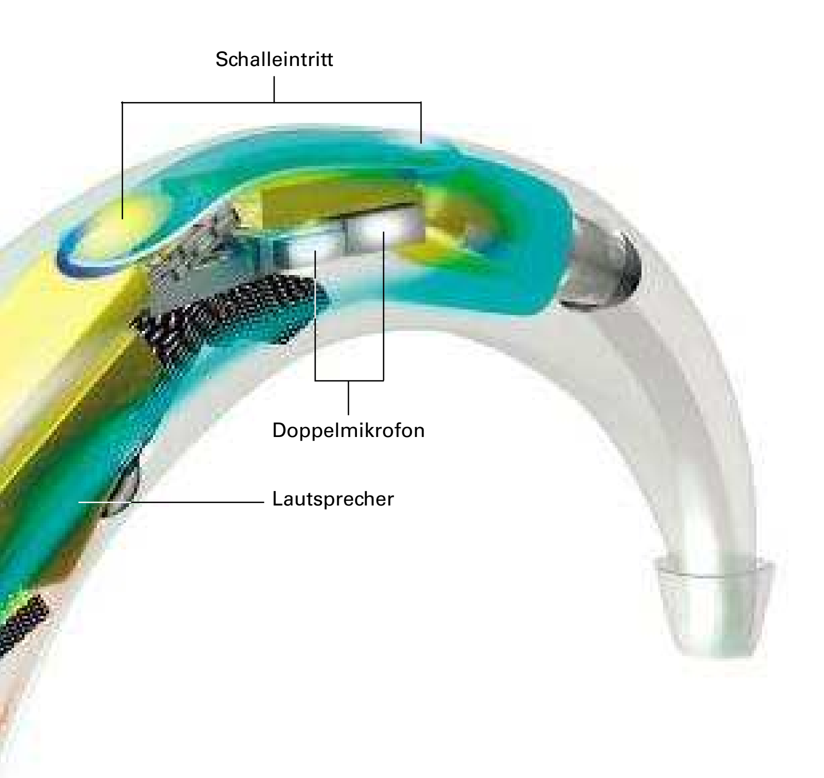




Digitale Hörgeräte analysieren den eintreffenden Schall in mehreren Frequenzkanälen, um Sprache und Störgeräusche zu unterscheiden und dann gegebenenfalls das Sprachsignal gezielt zu verstärken.



Hörverlust wird anhand des Schalldrucks gemessen, ab dem eine Wahrnehmung erfolgt (in Relation zum Hörvermögen eines jungen gesunden Menschen). Eine Verschlechterung um 20 dB bedeutet jeweils einen um den Faktor zehn höheren erforderlichen Schalldruck. Der dunkle Bereich umfasst Frequenz und Schalldruckpegel einer ruhigen Stimme, die Position von Vokalen und Konsonanten entspricht mittleren Werten.



Hinter dem Ohr getragene Hörgeräte können Schall um bis zu 80 dB verstärken. Sie eignen sich deshalb auch für hochgradig Schwerhörige. Denn diese Systeme bieten Platz für große Batterien, eine Telefonspule zum Empfang elektromagnetischer Wellen eines Telefonhörers oder einer Fernbedienung für die Einstellung. Zwei Mikrofone unterstützen das Richtungshören.

WUSSTEN SIE SCHON?

Schwerhörigkeit ist **nicht nur ein Altersleiden.** Laut offiziellen Studien leiden in Deutschland etwa 2,5 Prozent der 20-Jährigen an Hörschäden – mit steigender Tendenz; bei den 50-Jährigen sind es fast 10, bei den 75-Jährigen über 30 Prozent.

Rückkopplungen sind die Folge, wenn vom Lautsprecher erzeugter Schall wieder aufgenommen und erneut verstärkt wird. Digitale Prozessoren identifizieren die Störung und ihre Mittenfrequenz, sehr schmalbandige Filter eliminieren das unangenehme Pfeifen.

Wind an den Mikrofonöffnungen erzeugt ein tieffrequentes, fluktuierendes Rauschen. Die zugehörigen Spektren sind weit gehend unkorreliert – das ist der Hinweis für die Steuerung des Hörgeräts, zum Beispiel niedrige Frequenzen weniger zu verstärken.

Das bis ins späte 19. Jahrhundert verwendete Hörrohr verstärkte den Schall zwar um 10 bis 30 Dezibel, doch zwischen etwa 500 und 2000 Hertz. Gerade die für das Sprachverständnis wichtigen höheren Frequenzen gehen bei Schwerhörigkeit oft als Erste verloren.

Ewig junge Milchstraße

Lange hielten die Astronomen unser heimatliches Sternsystem für eine alternde Diva – doch neue Forschungen zeigen, dass es höchst dynamisch ist und sich ständig erneuert.

Steter Jungbrunnen: Unser Milchstraßensystem entwickelt sich permanent weiter, indem es riesige Gaswolken aufsaugt und kleinere Begleitgalaxien verschlingt.



RON MILLER

Von Bart P. Wakker und Philipp Richter

Manchmal sieht man den Wald vor lauter Bäumen nicht. Wir mögen beispielsweise mit vielen Einzelheiten unseres Wohnortes vertraut sein, doch eine Luftaufnahme wird uns völlig neue Einsichten bescheren. Wir Astronomen, die unsere kosmische Heimat, das Milchstraßensystem, erforschen, befinden uns in einer ähnlichen Situation: Wir beobachten Tausende von Sternen in unserer Umgebung, doch fehlt uns der Blick auf das Ganze. Betrachten wir wiederum andere Galaxien, sehen wir ihre großräumige Struktur, aber nicht ihre Details.

Es hat deswegen lange gedauert, bis wir Aufbau und Entwicklungsgeschichte unserer Galaxis verstanden haben. Bis in die 1920er Jahre hinein war noch nicht einmal bekannt, dass unser heimatliches Sternsystem ein deutlich vom Rest des Kosmos abgegrenztes Gebilde ist – eines unter vielen Milliarden. Erst Mitte der 1950er Jahre hatten die Astronomen es unter großen Schwierigkeiten geschafft, jenes Bild des Milchstraßensystems zusammenzusetzen, das die meisten Menschen heute in ihrer Vorstellung haben: eine riesige Spirale aus leuchtenden Sternen und dunklen Staubwolken. In den 1960er Jahren meinten dann Theoretiker, die Galaxis sei schon früh in der kosmischen Geschichte entstanden – vor etwa 13 Milliarden Jahren nach heutigen Abschätzungen – und habe sich seither kaum noch verändert.

Diese letzte Vorstellung hat sich langsam gewandelt. Inzwischen ist klar, dass das Milchstraßensystem keineswegs ausgereift ist, sondern sich ▷

▷ unablässig weiterentwickelt. Wie schon frühere Entdeckungen beruht auch diese Erkenntnis ganz wesentlich auf Beobachtungen anderer Galaxien – aus denen wir viel über unsere eigene Heimat lernen können. Offenbar sind die meisten Galaxien aus der Verschmelzung kleinerer Vorgängersysteme entstanden. An unserem eigenen Sternsystem können wir die letzte Phase dieses Prozesses beobachten: Unsere Galaxis zerreißt kleinere Begleitsysteme und nimmt deren Sterne in sich auf. Unterdessen strömen permanent Gaswolken aus dem intergalaktischen Raum in das Milchstraßensystem hinein. Man kann also nicht länger in der Vergangenheitsform von der Entstehung der Galaxien reden, denn dieser Prozess läuft noch heute ab.

Der stete Zufluss von Gas wird unter anderem durch die so genannten Hochgeschwindigkeitswolken belegt. Diese Ansammlungen von Wasserstoff bewegen sich mit rasanter Geschwindigkeit durch die äußeren Regionen der Galaxis. Manche dieser Wolken erstrecken sich über 10 000 Lichtjahre und enthalten so viel Gas, dass es für zehn Millionen Sterne reichen würde. Entdeckt wurden die Wolken schon Anfang der 1960er Jahre, doch erst in den letzten fünf Jahren haben neue Daten und Ideen ihre wahre Natur enthüllt. Die Dynamik der Wolken verrät, dass unser Milchstraßensystem riesige Mengen Gas ausstößt und sie anschließend wieder anzieht – so, als atme es ein und aus. Außerdem deuten die Eigenschaften der Hochgeschwindigkeitswolken darauf hin, dass die Galaxis von einer gigantischen Sphäre aus heißem, dünnem Plasma umhüllt ist. Die Astronomen hatten schon lange vermutet, dass es eine solche Sphäre gibt, aber niemand hatte geglaubt, dass sie so groß sein würde.

Rückblickend betrachtet war das Erkennen der Hochgeschwindigkeitswolken so schwer, weil wir von unserer Beobachtungsposition inmitten der Galaxis nicht einmal sicher sein konnten, wo sich diese Wolken genau befinden. Wir sehen nur ihre Position an der zweidimensionalen Himmelskugel, kennen aber nicht ihre Entfernung von uns. In den vergangenen vier Jahrzehnten hat diese Mehrdeutigkeit zu vielen unterschiedlichen Hypothesen geführt. Manche Forscher platzierten die Wolken in unserer unmittelbaren stellaren Nachbarschaft, andere hingegen tief im intergalaktischen Raum. Der Durchbruch war letztlich erst dadurch möglich, dass neue Teleskope auf der Erde und im Weltraum schließlich doch die räumliche Lage der Wolken ermittelten – und auf diese Weise sozusagen einen neuen Blick auf unsere Heimatstadt ermöglichten.

Stammt das Gas aus der Urzeit der Galaxis …

Unser Milchstraßensystem enthält rund 100 Milliarden Sterne. Die meisten davon sammeln sich in einer nur 3000 Lichtjahre dicken, aber 100 000 Lichtjahre breiten Scheibe. Diese Sterne umrunden das galaktische Zentrum auf nahezu kreisförmigen Bahnen – die Sonne beispielsweise mit einer Geschwindigkeit von etwa 200 Kilometern pro Sekunde. Weitere zehn Milliarden Sterne liegen im galaktischen Halo, einer großen sphärischen Hülle um die Scheibe. Der Raum zwischen den Sternen enthält Gas- und Staubmassen, die sich ebenfalls überwiegend auf fast kreisförmigen Bahnen um das galaktische Zentrum bewegen.

Dieses »interstellare Medium« ist – ähnlich einer Planetenatmosphäre, die an der Oberfläche am dichtesten ist – in der galaktischen Ebene am stärksten konzentriert und dünnt mit zunehmendem Abstand von dieser Ebene aus. Doch rund zehn Prozent des Gases befindet sich außerhalb der Scheibe und bewegt sich mit Geschwindigkeiten von bis zu 400 Kilometern pro Sekunde – weit schneller, als es der Rotation der Galaxis entspräche. Dieses Gas bildet die Hochgeschwindigkeitswolken.

Die Geschichte der Hochgeschwindigkeitswolken begann in den 1950er Jahren. Damals entdeckte Guido Münch vom California Institute of Technology in Pasadena dichte Gasballungen weit außerhalb der Milchstraßenebene – eine rätselhafte Ausnahme von der Regel, dass die Gasdichte mit dem Abstand von der galaktischen Ebene abnimmt. Sich selbst überlassen, sollten sich diese Gasansammlungen eigentlich rasch auflösen. 1956 schlug deshalb Lyman Spitzer jr. von der Universität Princeton vor, dass die Wolken durch den Druck einer heißen Gaskorona stabilisiert werden, welche das Milchstraßensystem umhüllt, ganz ähnlich wie die Sonnenkorona unser Zentralgestirn.

Von Spitzers Vorschlag inspiriert, überlegte sich Jan Oort von der Universität Leiden in den Niederlanden, dass auch der galaktische Halo fernab der Milchstraßenebene kalte Gaswolken enthalten könnte. 1963 gelang es tatsächlich, die Radiostrahlung solcher Gaswolken nachzuweisen. Im Gegensatz zu den von Münch entdeckten Wolken folgten sie aber nicht der Rotation des Milchstraßensystems – stattdessen schienen sie mit hoher Geschwindigkeit in Richtung galaktischer Scheibe zu fallen. Die Wolken erhielten daher die Bezeichnung *high velocity clouds* oder kurz HVCs. Im gleichen Jahr wurde auch ein anderer Typ sich auffällig, aber langsamer bewegender Wolken entdeckt, die so genannten Wolken mittlerer Geschwindigkeit (*intermediate velocity clouds*, IVCs).

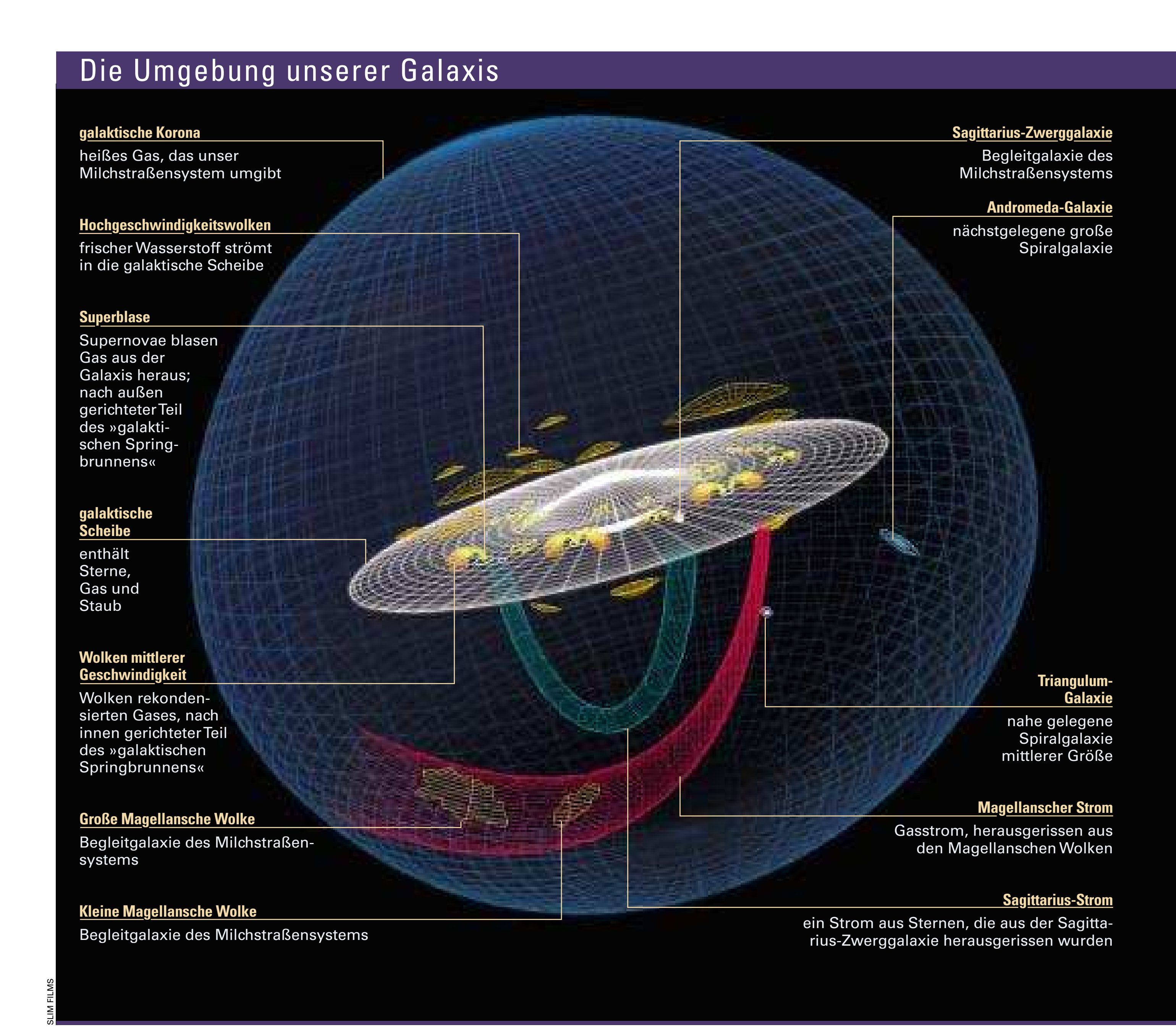
Oort verfeinerte seine Ideen später. Er vermutete, am Ende der Entstehungsphase der Galaxis sei am Rande des Einflussbereichs ihrer Schwerkraft Gas übrig geblieben. Erst nach mehr als zehn Milliarden Jahren habe dieses Gas die Scheibe des Milchstraßensystems erreicht und sei in Form der Hochgeschwindigkeitswolken in Erscheinung getreten. Oorts Idee fügt sich gut in die Modelle ein, mit denen die Astronomen die beobachtete chemische Zusammensetzung der Galaxis zu erklären versuchen. Die Sterne produzieren in ihrem Inneren schwere Elemente und verteilen sie am Ende ihres Daseins im Weltall. Neu entstandene Sterne nehmen diese schweren Elemente wieder auf – und produzieren ihrerseits

IN KÜRZE

Seit den frühen 1960er Jahren hatten die Astronomen geglaubt, das **Milchstraßensystem und andere Galaxien** seien früh in der kosmischen Geschichte entstanden und hätten sich danach nur noch wenig verändert.

Doch die Entdeckung und Untersuchung von Gasströmen in der Umgebung unseres Sternsystems zeigt: Der Entstehungsprozess ist noch längst nicht abgeschlossen. **Galaxien verändern ihren Aufbau** und ihr Inventar, indem sie ihre kleineren Geschwister verschlingen und frisches Gas aus dem intergalaktischen Raum aufnehmen.

Die Umgebung unserer Galaxis



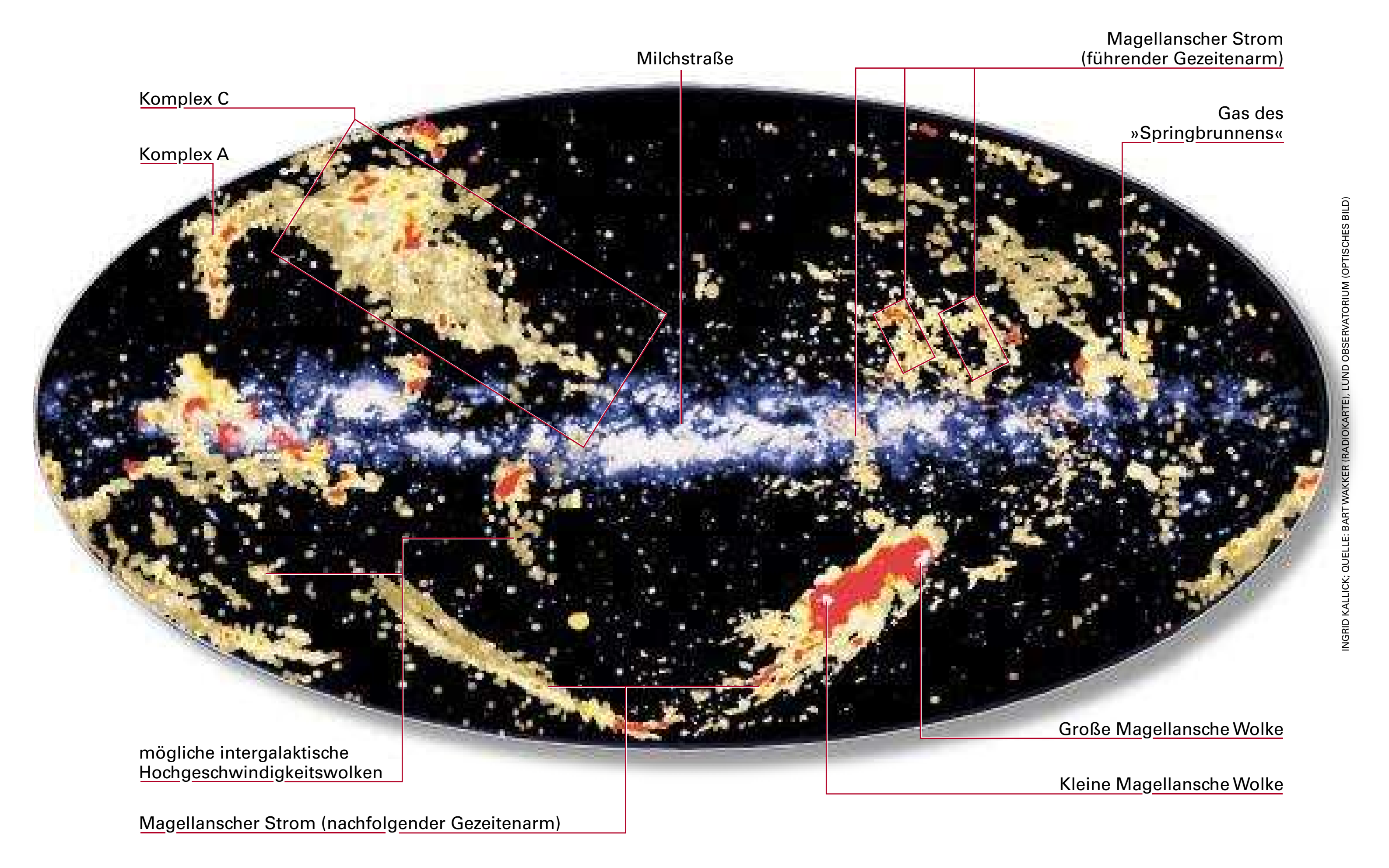
noch mehr davon. Würde sich also die Galaxis abgeschottet von ihrer Umgebung entwickeln, so müsste jede neue Sternengeneration mehr schwere Elemente enthalten.

… oder entspringt es einem galaktischen Springbrunnen?

Doch die meisten Sterne in der Umgebung der Sonne weisen etwa den gleichen Anteil an schweren Elementen auf, unabhängig von ihrem Alter. Die bevorzugte Erklärung für diesen scheinbaren Widerspruch ist, dass sich die Galaxis eben nicht als isoliertes System entwickele, sondern dass das interstellare Gas unablässig mit frischem Material von außerhalb angereichert werde. Viele Forscher vermuteten, dass einige oder alle Hochgeschwindigkeitswolken dieses frische Gas repräsentieren, aber die Beobachtungen lieferten dafür keine direkten Belege.

Nach einer anderen Hypothese, aufgestellt Mitte der 1970er Jahre von Paul Shapiro und George B. Field vom Harvard-Smithsonian-Zentrum für Astrophysik in Cambridge (Massachusetts), haben die Hochgeschwindigkeitswolken nichts mit dem Zustrom von Gas zu tun, sondern sind Bestandteil eines »galaktischen Springbrunnens«. Danach steigt von massereichen Sternen aufgeheiztes und ionisiertes Gas aus der Scheibe des Milchstraßensystems in die Korona auf und bildet eine Art galaktischer Atmosphäre. Einige Gebiete in dieser Atmosphäre kühlen sich ab, die ionisierten Atome rekombinieren und neutrale Gaswolken regnen auf die Scheibe zurück. Auf diese Weise entsteht ein permanenter Gaskreislauf zwischen Scheibe und Korona. 1980 schlug Joel Bregman, jetzt an der Universität von Michigan in Ann Arbor, vor, dass die Hochgeschwindigkeitswolken das aus der Korona zurückkehrende Gas seien – und für eine Weile blieb dies die bevorzugte Erklärung für ihren Ursprung.

Doch weder die Hypothese von Oort noch das Springbrunnen-Modell kann alle Eigenschaften der Hochgeschwindig- ▷



keitswolken erklären. In den 1970er Jahren machte die Entdeckung des »Magellanschen Stroms« das Problem noch komplizierter. Dabei handelt es sich um eine filamentartige Struktur aus Gas, die sich in einem Bogen um unsere Galaxis herum zieht. Der Strom folgt den Bahnen der Großen und der Kleinen Magellanschen Wolke, zwei kleinen Begleitgalaxien, die das Milchstraßensystem umkreisen wie Monde einen Planeten. Auch wenn die Astronomen den Begriff »Wolke« üblicherweise nur für Gas- und Staubansammlungen benutzen, tragen auch die beiden Sternsysteme diese Bezeichnung, denn sie sehen am südlichen Nachthimmel wie eine solche atmosphärische Erscheinung aus. Gegenwärtig sind sie rund 150 000 Lichtjahre vom Milchstraßensystem entfernt, das ist in etwa der geringste Abstand, den sie auf ihrer lang gestreckten Bahn einnehmen können.

Der Magellansche Strom verhält sich in vielerlei Hinsicht wie eine Aneinanderreihung von Hochgeschwindigkeitswolken. Ein großer Teil des Stroms bewegt sich mit Geschwindigkeiten, die nicht mit der galaktischen Rotation im Einklang stehen. Doch der Strom lässt sich andererseits nicht mit den beiden obigen Hypothesen erklären.

1996 veröffentlichten Lance T. Gardiner von der Sun-Moon-Universität in Südkorea und Masafumi Noguchi von der Tohoku-Universität in Sendai (Japan) das bis dahin detaillierteste Modell des Stroms. Demnach ist dieses Filament den Gezeitenströmen vergleichbar, die bei vielen anderen Galaxien zu beobachten sind. Als die Magellanschen Wolken vor 2,2 Milliarden Jahren das letzte Mal nahe an der Galaxis vorüberzogen, wurde der kleineren aus ihrer Peripherie eine erhebliche Gasmenge entrissen. Etwa die Hälfte dieses Gases wurde abgebremst und folgt seither den Magellanschen Wolken auf ihren Bahnen. Die andere Hälfte wurde beschleunigt und eilt daher den Sternsystemen voraus. Die Astronomen nennen so etwas einen »führenden Gezeitenarm«. Ein ähnlicher Prozess zerreißt möglicherweise auch andere Begleitgalaxien des Milchstraßensystems.

Ein anderes Modell sieht Reibung als Ursache des Magellanschen Stroms. Wenn das Milchstraßensystem eine sehr ausgedehnte Korona besäße – viel größer als von Spitzer vorgeschlagen –, dann könnte diese Korona den Magellanschen Wolken durch Reibung Gas entzogen und die Hochgeschwindigkeitswolken hervorgerufen haben.

Die Geschichte der Hochgeschwindigkeitswolken nahm 1999 erneut eine Wendung, als Leo Blitz von der Universität von Kalifornien in Berkeley und seine Koautoren vorschlugen, diese Gebilde seien sehr viel weiter entfernt als von den meisten Forschern für möglich gehalten:

Diese Karte des galaktischen Gases ist durch Überlagerung von Radiobeobachtungen von neutralem Wasserstoff (farbige Flecken) mit einem optischen Bild des Milchstraßensystems (weiß) entstanden. Die Zentralebene der galaktischen Scheibe verläuft waagrecht durch die Bildmitte, in der das galaktische Zentrum liegt. Die Hochgeschwindigkeitswolken aus neutralem Wasserstoff bewegen sich oberhalb und unterhalb der Scheibe.

Statt durch die Außenbezirke des Milchstraßensystems zu schwirren, sollten die Wolken sich frei durch die lokale Gruppe von Galaxien bewegen, zu der neben unserem Heimatsystem auch die Andromeda-Galaxie und 40 kleinere Sternsysteme gehören. Demnach wären die Hochgeschwindigkeitswolken Überbleibsel der Entstehung der rund vier Millionen Lichtjahre großen Lokalen Gruppe.

Ähnliche Vorschläge hatte es schon vor über 30 Jahren gegeben – doch waren sie wieder verworfen worden, weil Gaswolken dieser Größe nicht stabil sein können. Blitz vermutete deshalb, dass die Hochgeschwindigkeitswolken im Wesentlichen Zusammenballungen von Dunkler Materie sind mit einem relativ kleinen Gasanteil. Wenn das stimmt, dann sind die Hochgeschwindigkeitswolken zehnmal massereicher als bislang angenommen und können deshalb auch von ihrer Schwerkraft zusammengehalten werden. Das Reizvolle an Blitz' Hypothese ist, dass sie ein anderes Problem der Astronomen beseitigt. Die Modelle der Galaxienentstehung prognostizieren nämlich erheblich mehr Halos aus Dunkler Materie, als beobachtet werden (siehe Spektrum der Wissenschaft 9/2002, S. 54). Die Hochgeschwindigkeitswolken könnten diese fehlenden Halos sein.

Am Anfang des neuen Milleniums lagen den Astronomen also insgesamt vier Hypothesen für die Hochgeschwindigkeitswolken vor:

- frisches Gas, übrig geblieben aus der Entstehungszeit der Galaxis,
- ein Gaskreislauf durch einen »galaktischen Springbrunnen«,
- aus den Magellanschen Wolken entrissenes Gas und schließlich
- ein intergalaktisches Gemisch aus Dunkler Materie und Gas.

Für jede dieser Hypothesen sprach eine Reihe von Indizien. Für eine Entscheidung brauchten die Astronomen also neue Daten.

Glücklicherweise hatten die Beobachtungen seit Mitte der 1990er Jahre bedeutende Fortschritte gemacht. So lag erstmalig eine komplette Durchmusterung des gesamten Himmels im Radiobereich vor, welche die Strahlung des neutralen Wasserstoffs und somit die Lage von Gaswolken mit Temperaturen um 100 Kelvin erfasste. Aad Hulsbosch von der Universität Nijmwegen (Niederlande) und einer der Autoren (Wakker) beendeten bereits 1988 mit dem Dwingeloo-Radioteleskop den nördlichen Teil dieses Surveys. Ricardo Morras und seine Kollegen erfassten im Jahr 2000 mit dem Villa-Elisa-Radioteleskop in Argentinien die südliche Hemisphäre (Grafik links). Die Ergebnisse einer weiteren Durchmusterung, durchgeführt von Dap Hartmann und Butler Burton von der Sternwarte Leiden, wurden 1997 veröffentlicht – sie erfasste den gesamten neutralen Wasserstoff im Milchstraßensystem, inklusive der HVCs und der IVCs.

Wolken mit hohem Tempo

Einen weiteren wichtigen Beitrag lieferten Beobachtungen im sichtbaren Licht mit Instrumenten wie zum Beispiel dem »Wisconsin Hydrogen-Alpha Mapper« (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 30). Neutraler Wasserstoff sendet zwar kein sichtbares Licht aus, aber die Peripherie der Hochgeschwindigkeitswolken wird durch die ultraviolette Strahlung heißer Objekte in der Galaxis ionisiert – und wenn ionisierter Wasserstoff rekombiniert, emittiert er Strahlung im optischen Bereich. Die UV-Strahlung heizt zudem die Außenbezirke der Wolken auf bis zu 8000 Kelvin auf. Die im Optischen abgestrahlte Energie ist daher ein Maß für die Intensität des Strahlungsfelds in der Umgebung der HVCs, und diese Intensität hängt wiederum von der Entfernung der Wolke von der galaktischen Scheibe ab. Auf diese Weise lässt sich aus den optischen Beobachtungen die räumliche Lage der Hochgeschwindigkeitswolken abschätzen.

Den bedeutendsten Fortschritt lieferte die Beobachtung von Absorptionslinien im Spektrum der Wolken. Statt das Licht zu beobachten, das von den Wolken selbst ausgestrahlt wird, untersuchen die Astronomen dabei, wie die Strahlung von Hintergrundobjekten von den Wolken blockiert wird. Die wichtigsten Daten dazu lieferten die Sternwarte auf der Kanarischen Insel La Palma, das Hubble-Weltraumteleskop und der 1999 gestartete Satellit Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer, kurz »Fuse«.

Schon 1993 gelang es einer Arbeitsgruppe um Laura Danly, jetzt an der Universität Denver (Colorado), auf der Grundlage solcher Daten Grenzwerte für die Entfernung einer IVC zu bestimmen. Später vermochten Hugo van Woerden von der Universität Groningen und sein Team erstmalig die Entfernung zu einer HVC zu messen (siehe Kasten S. 54). In der Zwischenzeit haben wir gemeinsam mit unseren Kollegen die chemische Zusammensetzung der Wolken bestimmt und so die Informationen vervollständigt, die nötig sind, um zwischen den verschiedenen Hypothesen zu entscheiden.

In den Fuse-Daten zeigte sich, dass es eine sehr heiße Komponente der Hochgeschwindigkeitswolken gibt. Der Satellit fand Absorptionslinien, die von fünffach ionisiertem Sauerstoff stammen ▷



▷ (das sind Sauerstoffatome, die fünf ihrer acht Elektronen verloren haben). Demzufolge muss im Gas eine Temperatur von etwa 300 000 Kelvin herrschen. Solche Werte können auftreten, wenn sich kühles Gas mit Temperaturen um 100 Kelvin mit etwa eine Million Kelvin heißem Gas vermischt, oder wenn sich das ursprünglich extrem heiße Gas abkühlt. Gemeinsam mit Blair D. Savage von der Universität von Wisconsin in Madison und Kenneth R. Sembach vom Space Telescope Science Institute in Baltimore (Massachusetts) haben wir uns auf die Spur dieser warmen Komponente der Hochgeschwindigkeitswolken gemacht.

Komplexes Verhalten

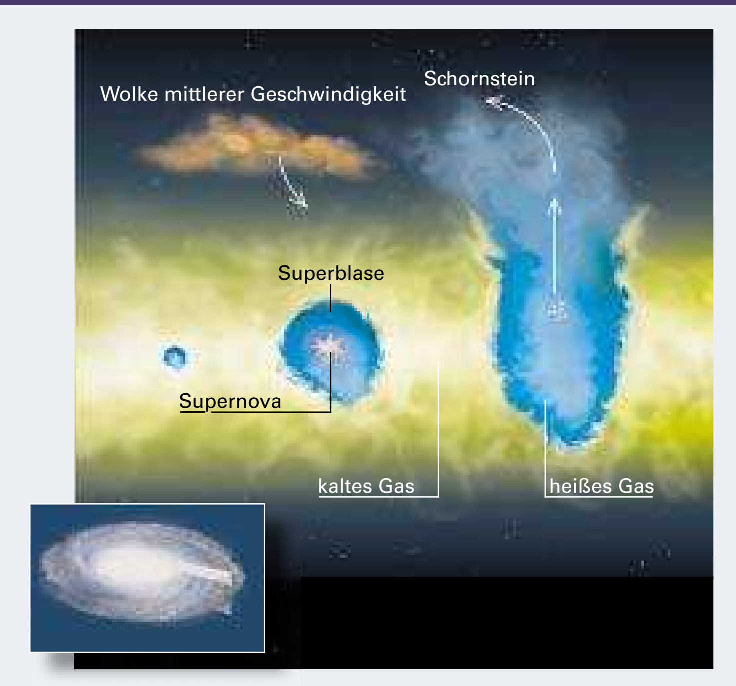
Nach Auswertung all dieser neuen Daten können wir nun endlich ein kohärentes Bild der Hochgeschwindigkeitswolken entwerfen. Beginnen wir mit zwei der größten, den 1963 entdeckten »Komplexen A und C«. Komplex A ist 25 000 bis 30 000 Lichtjahre von uns entfernt und liegt damit eindeutig im galaktischen Halo. Die Entfernung von Komplex C ist noch unsicher: Er befindet sich mindestens 14 000, aber vermutlich nicht mehr als 45 000 Lichtjahre oberhalb der galaktischen Ebene.

Die beiden Wolken zeigen nur ein Zehntel des Anteils an schweren Elementen wie unsere Sonne. Besonders niedrig ist der Anteil an Stickstoff im Komplex C, er beträgt nur ein Fünfzigstel des solaren Wertes. Daraus lässt sich schließen, dass die schweren Elemente dieser Hochgeschwindigkeitswolke ihren Ursprung in massereichen Sternen haben, die im Verhältnis weniger Stickstoff produzieren als Sterne geringer Masse. Da die aktuellen Modelle des frühen Universums vorhersagen, dass die ersten Sterne ungewöhnlich massereich waren, scheint Komplex C also ein Überbleibsel aus der frühesten Epoche des Kosmos zu sein.

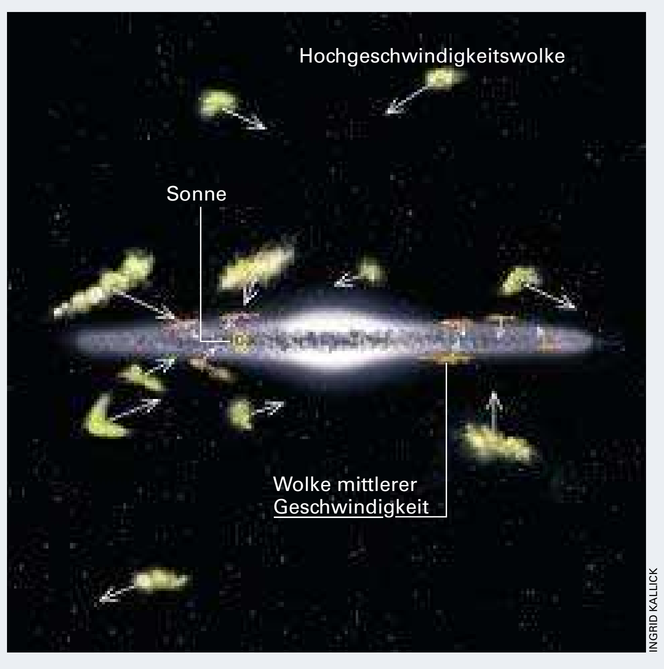
Brad Gibson von der Swinburne-Universität in Melbourne (Australien) hat sich einen anderen Teil des Komplexes C angeschaut und ist dabei auf einen doppelt so hohen Anteil an schweren Elementen gestoßen wie wir bei unseren früheren Messungen. Diese Unterschiede deuten darauf hin, dass sich das Gas von Komplex C mit anderen Gaswolken im galaktischen Halo zu vermischen beginnt, die einen höheren Anteil an schweren Elementen aufweisen. Andrew Fox und seinem Team aus Wisconsin gelang es mit ihren Messungen von ionisiertem Sauerstoff und anderen Ionen zu zeigen, dass das 300 000 Grad heiße Gas in Komplex C einen Übergangsbereich zwischen heißem und kühlem Gas darstellt. Wir scheinen also Komplex C gerade dabei zu beobachten, wie er sich langsam in unsere Galaxis einfügt.

Wolken wie Komplex A und C liefern uns die ersten direkten Belege für einen Einfall von frischem Gas in unsere Galaxis. Komplex C liefert 0,1 bis 0,2 Sonnenmassen an neuem Material pro Jahr, Komplex A etwa die Hälfte davon. Das entspricht etwa 10 bis 20 Prozent der Menge, die nötig ist, um das galaktische Gas zu verdünnen und die chemische Zusammensetzung der Sterne zu er-

Vier Theorien über unsere Milchstraße



Galaktischer Springbrunnen: Wolken mittlerer Geschwindigkeit stellen offenbar den zurückströmenden Teil eines gigantischen Gaskreislaufs dar. Anhäufungen von Supernova-Explosionen erzeugen Blasen aus heißem Gas (blau), die durch das umgebende kalte Gas (gelb) hindurchbrechen und so Nachschub für die heiße Korona liefern. Teile dieses Gases kühlen ab und fallen zurück in die Scheibe.



Gaseinfall: Viele der Hochgeschwindigkeitswolken (gelb) sind Gasmassen, die auf unser Milchstraßensystem herabregnen und so seit seiner Entstehung vor etwa zwölf Milliarden Jahren seine weitere Entwicklung in Gang halten. Aus dem frischen Gas könnten neue Sterne entstehen. Beobachtungstechnisch sind Hochgeschwindigkeitswolken nicht leicht von Wolken mittlerer Geschwindigkeit (orange) zu unterscheiden.

klären. Die anderen Hochgeschwindigkeitswolken liefern möglicherweise den Rest. Es ist allerdings noch unklar, ob dieses frische Gas letztlich aus einem bei der Entstehung der Galaxis übrig gebliebenen Halo (wie von Oort vorgeschlagen) stammt, aus dem tiefen intergalaktischen Raum oder vielleicht von einer Zwerggalaxie, die vom Milchstraßensystem verschlungen wurde.

Vielfalt der Ursprünge

Die Ergebnisse eliminieren drei der Hypothesen für den Ursprung der Komplexe A und C. Die Springbrunnen-Hypothese impliziert, dass das Gas aus der Scheibe stammt – es müsste folglich etwa die gleiche chemische Zusammensetzung haben wie die Sonne. Das ist jedoch nicht der Fall. Die Hypothese vom Magellanschen Strom liefert ebenfalls falsche Werte für die chemische Zusammensetzung. Die Dunkle-Materie-Hypothese schließlich versagt, weil diese beiden Hochgeschwindigkeitswolken nicht im intergalaktischen Raum liegen.

Es zeigt sich jedoch, dass die drei Erklärungsversuche nicht völlig falsch sind. Wir müssen freilich woanders nachsehen, um herauszufinden, wo sie zutreffen.

Lange standen die IVCs, die Wolken mittlerer Geschwindigkeit, im Schatten der auffälligeren und geheimnisvolleren HVCs. Mehrere Forscherteams haben jetzt unabhängig voneinander ihre Zusammensetzung gemessen: Sie stimmt gut mit jener der galaktischen Scheibe überein. Die IVCs befinden sich außerdem etwa 4000 Lichtjahre oberhalb der galaktischen Ebene, genau dort, wo die Fontäne des »Springbrunnens« sein sollte. Beides weist darauf hin, dass die IVCs, im Gegensatz zu den Hochgeschwindigkeitswolken, die zurückfließende Materie des galaktischen Springbrunnens darstellen.

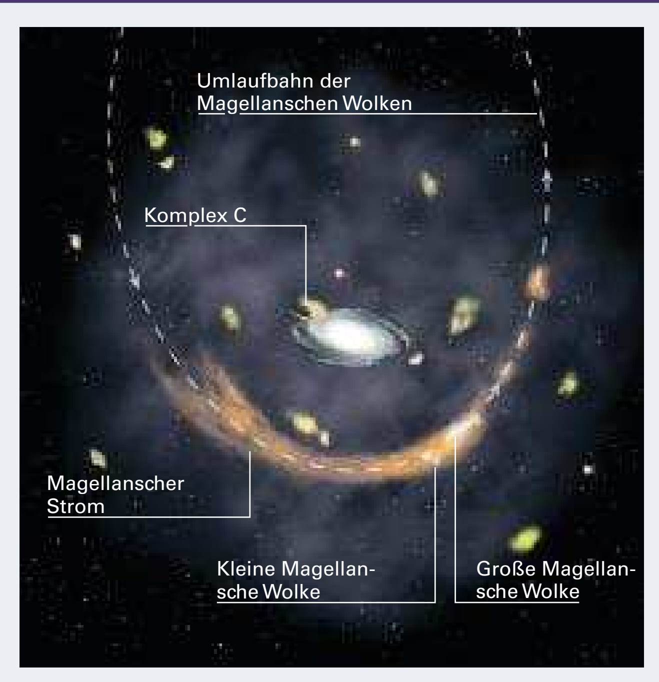
Ein weiteres Indiz dafür ist die Entdeckung von Wasserstoff-Molekülen in den IVCs, denn diese Moleküle können im interstellaren Raum im Wesentlichen nur in Anwesenheit von Staubkörnern entstehen – und solche Staubkörner wiederum sind nur dann in ausreichender Zahl vorhanden, wenn das Gas chemisch angereichert ist. Deshalb finden wir auch keinen molekularen Wasserstoff im Komplex C. Wolken mittlerer Geschwindigkeit sind also recyceltes Gas aus der Galaxis, während diejenigen hoher Geschwindigkeit in erster Linie aus von außen einströmendem Gas bestehen. ▷

RON MILLER

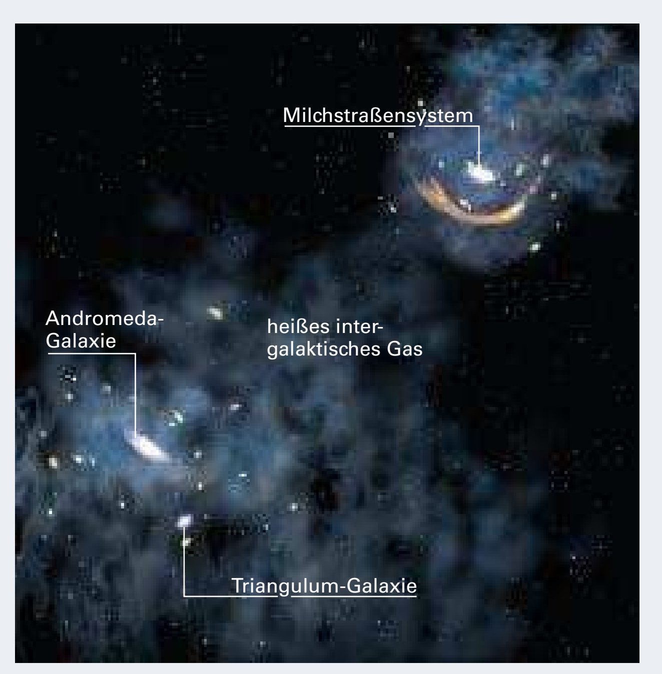
Sagittarius-Zwerggalaxie

Sagittarius-Strom

Die 1994 entdeckte Sagittarius-Zwerggalaxie ist dem Milchstraßensystem so nahe gekommen, dass Gezeitenkräfte auch Sterne herausreißen (als Sagittarius-Strom sichtbar) und sie schließlich unserer Galaxis einverleiben.



Galaktischer Kannibalismus: Das Milchstraßensystem entreißt der Großen und der Kleinen Magellanschen Wolke Gas, das sich entlang ihrer Umlaufbahn im Magellanschen Strom (orange) bewegt. Andere Hochgeschwindigkeitswolken (gelb) sind von diesem Strom unabhängig, obwohl sie sich in der gleichen Gegend tummeln. Möglicherweise handelt es sich bei ihnen um Gas, das aus der heißen Korona auskondensiert.



Intergalaktisches Reservoir: Das Milchstraßensystem und die Andromeda-Galaxie sind möglicherweise in ein Meer aus heißem intergalaktischen Gas (blau) eingebettet. Bereiche dieses Gases könnten sich abkühlen, auskondensieren und gravitativ von den Galaxien eingefangen werden – und so neue Hochgeschwindigkeitswolken bilden, die in die Galaxien hineinfallen. Dieses Modell ist jedoch noch spekulativ.

Blick hinter die Wolken

Die Hochgeschwindigkeitswolken (HVCs) haben die Astronomen jahrzehntelang verwirrt, weil unklar war, woraus sie bestehen und wie weit sie entfernt sind. Das einzige bekannte Mittel, mit dem man das herausbekommen kann, ist die Absorptionslinien-Methode. Das Licht von Sternen und Galaxien, die von uns aus gesehen hinter einer HVC liegen, durchquert das Gas der Wolke. Das meiste Licht passiert das Gas ungehindert, aber bei einigen Wellenlängen wird ein Teil davon absorbiert – und das verrät die Eigenschaften der Wolke.

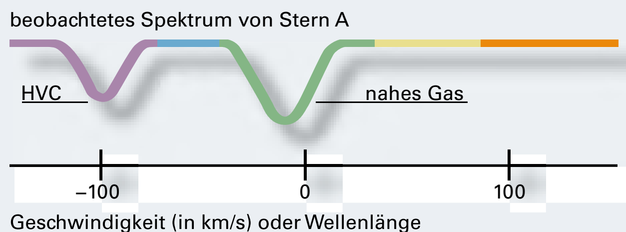
Wenn das Spektrum eines Sterns Absorptionslinien enthält, bedeutet dies, dass sich zwischen ihm und uns eine Gaswolke befinden muss. Die Entfernung des Sterns bildet dann eine obere Grenze für die Entfernung dieser Wolke. Umgekehrt liefert das Fehlen von Absorptionslinien bei einem Stern, der in gleicher Blickrichtung wie eine Wolke liegt, eine untere Grenze für ihre Entfernung. Natürlich müssen dabei gewisse Voraussetzungen erfüllt sein: Die Entfernungen der Sterne müssen mit ausreichender Genauigkeit bekannt sein, in dem Gas müssen genügend schwere Elemente vorhanden sein, die Licht absorbieren können, und die beobachteten Absorptionslinien dürfen nicht von den Sternen selbst stammen.

Die Erfahrung zeigt, dass sich die Linien des neutralen Sauerstoffs und des ionisierten Schwefels am besten für die Messungen eignen. Diese Linien liegen im ultravioletten Bereich des Spektrums, lassen sich also nur mit Hilfe spezieller Satellitenteleskope wie dem Hubble-Weltraumteleskop oder dem Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer (Fuse) beobachten. Für die Entfernungsbestimmung von HVCs eignen sich so genannte RR-Lyrae-Sterne und blaue Horizontalast-Sterne am besten. Es gibt sie in großer Zahl, ihre Entfernungen lassen sich sehr genau bestimmen und ihre wenigen eigenen Absorptionslinien überlappen sich nicht mit denen der Wolken. Um die Häufigkeit von schweren Elementen in den Wolken zu ermitteln, eignen sich allerdings weit entfernte aktive Galaxien und Quasare besser, weil diese Himmelsobjekte im UV-Bereich heller strahlen und ihre Spektren häufig keine Linien aufweisen.

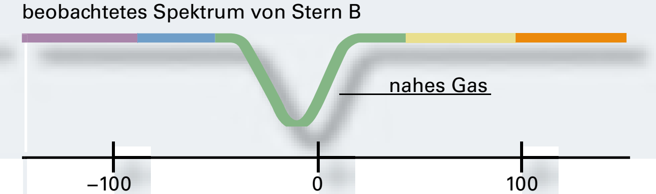
Das Licht eines einzelnen Sterns oder einer einzelnen Galaxie kann natürlich auf seinem Weg zu uns mehr als nur eine einzige Wolke durchqueren. Da sich jede dieser Wolken mit einer anderen Geschwindigkeit bewegt, treten die Absorptionslinien infolge des Doppler-Effekts bei verschiedenen Wellenlängen auf. Die unterschiedlichen Wolken lassen sich nur mit einem Spektrografen hoher Auflösung – und somit auch nur mit einem großen Teleskop – voneinander trennen.



Die Entfernung einer Hochgeschwindigkeitswolke (HVC) lässt sich nur indirekt ermitteln. Dieses konstruierte Beispiel verdeutlicht die Messmethode anhand zweier Sterne A und B, die hinter beziehungsweise vor der HVC liegen.



Im Spektrum von Stern A, der sowohl hinter der nahen Gaswolke als auch hinter der Hochgeschwindigkeitswolke liegt, beobachten die Astronomen zwei Absorptionslinien. Aus den unterschiedlichen Wellenlängen dieser Linien können sie schließen, dass das Licht zwei Wolken unterschiedlicher Geschwindigkeit passiert hat.



Im Spektrum von Stern B zeigt sich nur die Absorptionslinie, die durch die nahe gelegene, langsame Gaswolke verursacht wird. Falls die Astronomen die Entfernungen der Sterne A und B anderweitig ermitteln können, lässt sich daraus eine obere und eine untere Grenze für die Entfernung der Hochgeschwindigkeitswolke angeben.

Zumindest eine der bekannten Hochgeschwindigkeitswolken scheint indes tatsächlich ein Ableger des Magellanschen Stroms zu sein: Ihre chemische Zusammensetzung gleicht jener der Kleinen Magellanschen Wolke, wie Limin Lu und seine Kollegen aus Wisconsin 1998 herausfanden. Die Wolke ist im führenden Arm des Stroms eingebettet. Das bedeutet, dass die Kräfte, die dieses Gas aus der Magellanschen Wolke herausrissen, es auch beschleunigt haben müssen. Reibungskräfte sind dazu nicht in der Lage – es müssen also Gezeitenkräfte am Werk gewesen sein. Lus Entdeckung hat somit zugleich die Frage nach der Entstehung des Magellanschen Stroms beantwortet.

Trotzdem könnten auch Reibungskräfte von Bedeutung sein. Der Satellit Fuse hat hochgradig ionisierten Sauerstoff nachgewiesen, der mit dem Magellanschen Strom assoziiert ist. Das deutet darauf hin, dass auch er in heißes Gas eingebettet ist. Die galaktische Korona muss demnach viel weiter hinausreichen als ursprünglich von Spitzer vorgeschlagen – nämlich einige hunderttausend Lichtjahre statt nur wenige tausend. Die Korona ist zwar nicht dicht genug, um Gas aus den Magellanschen Wolken herauszureißen. Aber wenn das Gas erst einmal durch Gezeitenkräfte aus diesen Sternsystemen herausgezogen worden ist, dann wird es durch Reibung in der Korona langsam abgebremst, regnet anschließend auf die Galaxis herab und trägt so zum Wachstum des Milchstraßensystems bei.

Auch die Hypothese von der Dunklen Materie könnte sich in ein größeres Schema einfügen, selbst wenn sie die Komplexe A und C nicht zu erklären vermag. Blitz hatte ursprünglich vermutet, die intergalaktischen Hochgeschwindigkeitswolken hätten eine Masse von zehn bis hundert Millionen Sonnenmassen. Derartige Wolken konnten jedoch in nahen Galaxiengruppen, die unserer Lokalen Gruppe ähneln, nicht aufgespürt werden, obwohl die Beobachtungen dazu inzwischen ausreichend empfindlich sind. Außerdem sagt die Hypothese von der Dunklen Materie voraus, dass die optische Emission der Hochgeschwindigkeitswolken zu schwach ist, um entdeckt zu werden – doch in fast allen Fällen, in denen nach optischer Strahlung dieser Wolken gesucht wurde, ließ sie sich auch nachweisen. Schließlich zeigen theoretische Überlegungen, dass die HVCs, wenn sie weit entfernt sind, entweder vollständig ionisiert oder extrem massereich sein müssten – beides steht jedoch im Widerspruch zu den Beobachtungsdaten. Bei den Hochgeschwindigkeitswolken scheint es sich also nicht um die vorhergesagte Population von Wolken aus Dunkler Materie zu handeln.

Riesiges Gasreservoir hält Jungbrunnen in Gang

Robert Braun vom Dwingeloo-Observatorium sowie Butler Burton und Vincent de Heij aus Leiden halten es deshalb für möglich, dass sowohl unser Milchstraßensystem als auch die Andromeda-Galaxie von vielen hundert kleinen Wolken umgeben ist, die fast vollständig aus Dunkler Materie und ionisiertem Gas mit nur einem geringen Anteil von neutralem Wasserstoff bestehen. Diese Wolken enthielten jeweils maximal zehn Millionen Sonnenmassen und würden nicht über die ganze Lokale Gruppe verteilt sein, sondern sich in einem Umkreis von jeweils 500 000 Lichtjahren um ihre Galaxien aufhalten.

Während also die neutralen Hochgeschwindigkeitswolken offenbar nicht über die gesamte Lokale Gruppe verteilt sind, könnte dies doch auf andere Arten von sich mit hoher Geschwindigkeit bewegendem Gas zutreffen. Fuse hat hochgradig ionisierten Sauerstoff nachgewiesen, der sich rasant bewegt, aber nicht mit neutralem Gas assoziiert ist. Ähnliche Wolken aus heißem Gas konnten von einer Forschungsgruppe um Todd M. Tripp aus Princeton auch andernorts im Universum nachgewiesen werden. Möglicherweise handelt es sich bei diesem Gas um Filamente, die den intergalaktischen Raum durchziehen. Solche Filamente zeigen sich auch in Simulationen der großräumigen Struktur des Kosmos (siehe Spektrum der Wissenschaft 11/2002, S. 36). Sie könnten insgesamt sogar mehr Materie enthalten als alle Galaxien zusammen – sie wären also ein riesiges Reservoir, aus dem das Milchstraßensystem und andere Galaxien frische Materie zur Bildung neuer Sterne zapfen könnten.

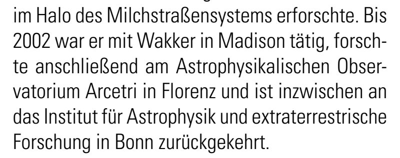
Die Hochgeschwindigkeitswolken, die unsere Galaxis umschwirren, erinnern uns daran, dass wir in einem Sternsystem leben, das sich permanent weiterentwickelt. Ursprünglich war das Milchstraßensystem von vielen kleineren Begleitgalaxien und einer großen Menge unverbrauchtem Gas umgeben. Innerhalb der Jahrmilliarden hat es sich die meisten dieser Satellitensysteme einverleibt. Die Galaxis hat vermutlich auch einen großen Teil des frischen Gases aus ihrer Umgebung aufgesogen – es könnte sich aber immer noch sehr viel Restmaterial dort draußen aufhalten. In Form der Hochgeschwindigkeitswolken strömt dieses Gas in unser Sternsystem hinein. Gleichzeitig strömt mit schweren Elementen angereichertes Gas aus der Galaxis hinaus in den Halo – und vielleicht sogar hinaus bis in den intergalaktischen Raum.

Innerhalb der kommenden zehn Milliarden Jahre werden weitere Zwerggalaxien mit dem Milchstraßensystem verschmelzen und so neue Sternenströme bilden, ähnlich jenen, die wir jetzt im Halo sehen. Zudem befindet sich unsere Galaxis auf Kollisionskurs mit der Andromeda-Galaxie. Wir können jetzt noch nicht genau vorhersagen, wie unser Sternsystem – oder was dann davon übrig ist – in ferner Zukunft aussieht. Aber eines ist sicher: Seine Entwicklung ist noch lange nicht zu Ende. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



Bart P. Wakker hatte bereits in seiner Doktorarbeit an der Universität Groningen (Niederlande) über Hochgeschwindigkeitswolken geforscht. Nach fünf Jahren an der Universität von Illinois wechselte er 1995 an die Universität von Wisconsin in Madison. **Philipp Richter** promovierte 1999 an der Sternwarte der Universität Bonn, wo er das diffuse molekulare Gas in den Magellanschen Wolken und im Halo des Milchstraßensystems erforschte. Bis 2002 war er mit Wakker in Madison tätig, forschte anschließend am Astrophysikalischen Observatorium Arcetri in Florenz und ist inzwischen an das Institut für Astrophysik und extraterrestrische Forschung in Bonn zurückgekehrt.



Die Entstehung der Galaxis. Von Christina Chiappini, Spektrum der Wissenschaft 6/2002, S. 38

A Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer survey of molecular hydrogen in intermediate-velocity clouds in the Milky Way halo. Von P. Richter et al. in: Astrophysical Journal, Bd. 586, Nr.1, S. 230 (20. März 2003)

High-velocity clouds. Von B. P. Wakker und H. van Woerden in: Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Bd. 35, S. 217, September 1997

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Wenn der Frühling zu früh kommt

Die Klimaerwärmung bringt manche Ökosysteme jetzt schon aus dem Gleichgewicht. Besonders im Frühjahr geraten eingespielte Beziehungen zwischen Tier- und Pflanzenarten durcheinander.

Von Daniel Grossman

Richard Fitter führte über die Natur vor seiner Haustür jahrzehntelang Tagebuch. Der heute über neunzigjährige englische Forscher notierte sich, wann die einzelnen Pflanzenarten anfangen zu blühen, die Zugvögel zurückkehren, die Schmetterlinge im Herbst verschwinden und vieles mehr. Er verfasste auch einige Dutzend beliebte Naturführer und weitere Bücher über Wildblumen, Vögel und anderes. Doch seine akribischen Notizen zum Verlauf der Natur in den Jahreszeiten wertete er als reines Hobby.

Systematische Aufzeichnungen wie diese, zumal vom selben Forscher, über das Verhalten einer so großen Anzahl von Tier- und Pflanzenarten einer Gegend – in dem Fall ein ländliches Gebiet bei Oxford – sind selten. Deswegen nahm sich Richard Fitters Sohn Alastair, der als Ökologe an der Universität York lehrt, im Jahr 2001 der Listen an. Mittlerweile umfassten sie 47 Jahre.

Alastair Fitter wollte sehen, ob die Pflanzenwelt schon auf die Klimaerwärmung reagiert hat. Dass die Oberflächentemperatur der Erde in den letzten hundert Jahren um 0,6 Grad Celsius angestiegen ist, gilt heute als sicher. Seit Beginn der Messungen waren zudem die 1990er Jahre das wärmste Jahrzehnt.

Alastair Fitter hatte die Notizen seines Vaters Anfang der 1990er Jahre schon einmal durchgesehen. Damals fand er kein klares Muster. Doch als er nun die gesamten 1990er Jahre mit den vier Jahrzehnten davor verglich, erkannte er einen deutlichen Trend: Das Datum, an dem die verschiedenen Pflanzenarten im Frühjahr ihre ersten Blüten zeigten, lag im Durchschnitt um mehrere Tage früher! Richard Fitters Listen enthielten den Blühbeginn von über 500 Arten. Von denen blühten 385 eher, im Durchschnitt viereinhalb Tage, sechzig davon im Mittel sogar volle zwei Wochen. Zumindest bei Oxford, folgerten die Fitters daraus, schien sich der Klimawandel extrem plötzlich zu vollziehen.

IN KÜRZE

▶ Die **globalen Temperaturen** steigen. Besonders in den kälteren und gemäßigten Breiten wird es wärmer. Jetzt schon geraten in Mitteleuropa eingespielte **Ökosysteme** aus der Balance, weil die einzelnen Tier- und Pflanzenarten auf die Veränderung nicht in gleicher Weise reagieren.

▶ Eine Anzahl von Pflanzen beginnt rund **fünf Tage eher** als vor zwanzig Jahren mit der Blüte. Das hat Auswirkungen auf die Brut von **Vogelpopulationen**: Insekten erscheinen für manche Vögel zu früh.

▶ Manche **Zugvögel**, die aus den Tropen kommen, treffen zu spät im Brutgebiet ein. Die Zeitsignale, die sie im Überwinterungsgebiet beachten, stimmen nicht mehr mit dem vorgeschobenen Frühjahr weiter im Norden überein.

Die beiden Forscher veröffentlichten dieses Ergebnis im Mai 2002 in der Wissenschaftszeitschrift »Science«. Ihre Arbeit gehört zu den eindrucksvollsten einer Anzahl neuerer Studien, die Veränderungen in der Tier- und Pflanzenwelt beschreiben, deren Ursache Klimaverschiebungen sein könnten. Ebenfalls im Jahr 2002 hat der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimafragen (IPCC) in seinem fünften Wissenstandsbericht unter dem Titel »Klimawandel und biologische Vielfalt« die Ergebnisse von 2500 entsprechenden publizierten Studien zusammengefasst. Dieses Gremium mit Hauptsitz in Genf entstand 1988 über das Umweltprogramm der UN und die Weltorganisation für Meteorologie. Viele der Arbeiten im IPCC-Bericht befassen sich mit Auswirkungen der Temperatur auf Tiere oder Pflanzen in den letzten zwanzig Jahren oder länger.

Von den mehr als 500 angeführten Arten – Vögel, Amphibien, Pflanzen und andere Organismen – haben 80 Prozent ihre Fortpflanzungszyklen, Zugzeiten oder Wachstumsphasen in eine Richtung verlagert, wie es bei steigenden Temperaturen zu erwarten ist. Auch Populationsgrößen und Verbreitungsgebiete scheinen sich zu ändern. Die Autoren der IPCC-Studie folgerten, dass im 20. Jahrhundert regionale Klimaveränderungen, insbesondere ansteigende Temperaturen, »einen erkennbaren Einfluss auf biologische Systeme« gehabt hätten.

In den meisten dieser Arbeiten haben die Forscher nicht untersucht, ob die Entwicklung den Organismen geschadet hat oder zukünftig schaden wird. Auch

CORBIS

die Daten der Fitters über den Blühbeginn genügen nicht, um das aufzuzeigen. Doch Alastair Fitter glaubt, dass unerwünschte Auswirkungen zwangsläufig auftreten werden: »Wann eine Pflanze blüht, mag ja zunächst nicht so wichtig erscheinen. Es ist aber nicht egal, wenn deswegen Tiere aussterben. Das wird als Nächstes kommen.«

Nahrungsketten zerreißen

Jetzt schon liefern einige Studien erste Belege dafür, dass die höheren Temperaturen feste Wechselbeziehungen zwischen Pflanzen und Tieren in Ökosystemen zu beeinträchtigen beginnen. So droht in manchen Fällen der Zusammenhalt von etablierten Nahrungsketten verloren zu gehen, was bedeutet, dass sich die betreffenden Arten in ihrem bisherigen Lebensraum kaum noch behaupten können. Mindestens in einem Beispiel – bei einer Pinguinart – scheint sicher zu sein, dass eine gesamte Population in den nächsten 15 Jahren aus einer Region völlig verschwinden wird.

Wichtige Untersuchungen zu diesem Themenkomplex liefern der niederländische Ökologe Marcel E. Visser und seine Mitarbeiter. Visser leitet in Heteren, südwestlich von Arnheim, am Zentrum für Terrestrische Ökologie die Abteilung Populationsbiologie der Tiere. Das Zentrum gehört zum Niederländischen Institut für Ökologie, einem Zweig der Königlich-Niederländischen Akademie der Wissenschaften.

Visser ist der heutige Leiter einer Langzeitstudie an Kohlmeisen, die seit den 1950er Jahren im nahe Heteren gelegenen Nationalpark Hoge Veluwe läuft. Die Initiatoren hatten keineswegs die Untersuchung der Folgen irgendeines Klimawandels im Sinn. Jetzt gehört das Projekt zu den ganz wenigen weltweit, die aufzeigen, wie in Ökosystemen Effekte der Klimaerwärmung Nahrungsketten zerstören können.

In jedem Frühjahr kontrolliert das Team allwöchentlich die Kohlmeisenpaare, die in rund 400 verteilten Nistkästen brüten. Die Vögel werden gefangen, gewogen und vermessen. Die Forscher erfassen auch Gesundheitszustand und Fortpflanzungsaktivität. Wenn die Jungen geschlüpft sind, erfolgt täglich eine Nestkontrolle. Was bei der statistischen Analyse der Daten herauskommt, klingt dem ersten Anschein nach harmlos genug: Die Meisen legen ihre Eier stets um den 23. April. Das war im letzten Frühjahr nicht anders als Anfang der 1980er Jahre.

▲ Trauerschnäpper kehren jetzt zu spät aus ihrem Winterquartier in Afrika zurück. Den Zeitverlust beim Brüten können sie nur knapp kompensieren.

Doch der erste Blick täuscht. Seit Mitte der 1980er Jahre ist der Frühling in der Gegend um zwei Grad wärmer geworden. Besonders im mittleren Frühjahr, zwischen Mitte April und Mitte Mai, sind die Temperaturen angestiegen. Die Raupen des Kleinen Frostspanners, wissenschaftlich *Operophtera brumata*, beeinflusst das sehr wohl. Hauptsächlich ▷

▷ mit den Larven dieser unscheinbaren Schmetterlingsart füttern die Kohlmeisen ihre Nestlinge. In größter Menge gibt es die Raupen jetzt etwa zwei Wochen eher als vor zwanzig Jahren. Damals fanden die Kohlmeiseneltern sie massenhaft genau zur passenden Zeit. Heute klingt die Saison solchen Futters schon ab, wenn das Gros der Meisen erst schlüpft. Das Nahrungsnetz des Ökosystems droht an dieser Stelle zu zerreißen.

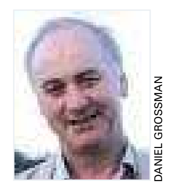
Allerdings dürfte das nicht dessen einzige Schwachstelle sein, an der sich Arten zeitlich auseinander entwickeln – sich entkoppeln, wie Visser das nennt. Das Forscherteam untersuchte auch die Beziehung der Frostspanner zu Eichen, von deren jungen Blättern diese Raupen im Hoge-Veluwe-Park vor allem leben. Wie sich herausstellte, müssen sie in einem bestimmten Zeitfenster schlüpfen. Sie überstehen ohne Nahrung kaum mehr als fünf Tage. Andererseits dürfen sie auch wieder nicht zu spät kommen, weil die Blätter dann Gerbstoffe einlagern, die den Raupen nicht bekommen.

Visser wies nach, dass die Knospen der Eichenblätter im Hoge-Veluwe-Nationalpark heute etwa zehn Tage früher aufspringen als vor zwanzig Jahren. Schon damals schlüpften die Raupen im Mittel einige Tage, bevor sich die Eichen begrünten. Jetzt hat sich ihr Schlupftermin zusätzlich um rund zwei Wochen auf Mitte Mai verschoben. Das Intervall, bis sie Futter finden würden, ist für viele von ihnen heute schon zu lang.

Tatsächlich belegen Vissers Forschungen, dass die Population der kleinen Frostspanner im Hoge-Veluwe-Park in letzter Zeit schrumpft. Doch der Forscher betont, es sei noch zu früh, um sich des postulierten Zusammenhangs sicher sein zu können. Es gibt in Ökosystemen auch langjährige zyklische Schwankungen. Um solch einen Faktor auszuschließen, müsste man die Population noch länger beobachten.



GUSTO / SPL / PHOTO RESEARCHERS, INC.



DANIEL GROSSMAN

◀ **Pflanzenführer müssten umgeschrieben werden: Die Taubnessel (links) blühte in den letzten Jahren in Mittelengland oft schon Ende Januar. Vor einigen Jahrzehnten setzte die Blüte Mitte März ein. Der Ökologe Alastair Fitter (Foto) und sein Vater Richard Fitter wiesen nach, dass sich die Pflanzenblüte einiger hundert Arten bei Oxford in England vorverlagert hat.**

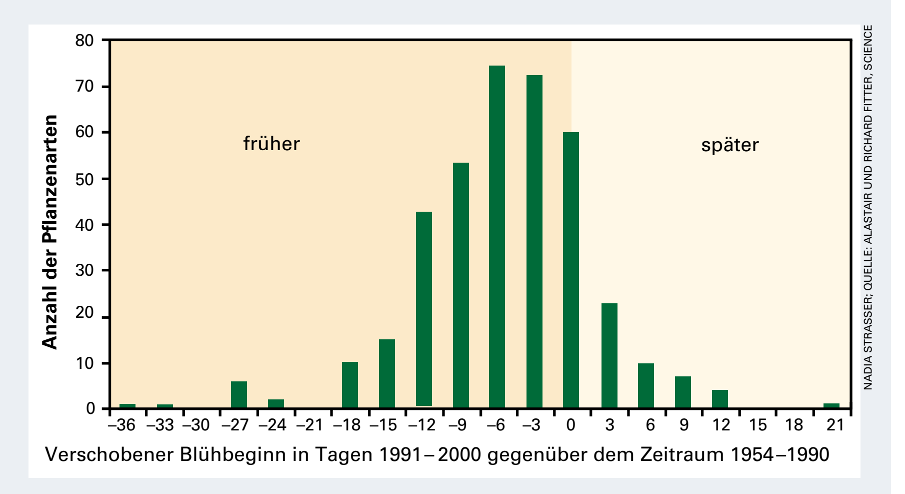
Dass die Kohlmeisen weniger geworden sind, lässt sich bisher nicht nachweisen – trotz des geringeren Vorkommens an Frostspannerraupen während der Hauptfütterphase. Möglich wäre, dass die jährlichen Schwankungen der Meisenpopulation einen langfristigen Trend bisher noch überdecken. Die aktuelle Zahl der Brutpaare hängt von sehr vielem ab, etwa vom Nahrungsangebot im letzten Winter. Visser meint aber, es sei »nur eine Frage der Zeit, bis die Meisenpopulation zusammenbricht«. Für ein ökologisches System, in dem das präzise zeitliche Zusammenspiel so entscheidend sei, bleibe es nicht ohne Folgen, wenn sich die Glieder der Nahrungskette immer mehr entkoppeln.

Das Tagebuch von Richard Fitter

Von insgesamt 557 Pflanzenarten notierte Richard Fitter fast fünfzig Jahre lang in einer Landschaft bei Oxford den Blühbeginn im Frühjahr. In den 1990er Jahren blühten 385 davon eher als in den vier Jahrzehnten davor.

Im Mittel setzte deren Blüte rund viereinhalb Tage früher ein. Eine wesentlich kleinere Fraktion blühte später als in den vorangegangenen Jahrzehnten.

Zwei Ausreißer sind in dieser Darstellung weggelassen: Die weiße Taubnessel, die jetzt fast zwei Monate eher zu blühen anfängt, und der in Europa eingeführte Sommerflieder oder Schmetterlingsstrauch *Buddleja* aus China, dessen Blüte über einen Monat später einsetzt.



NADIA STRASSER; QUELLE: ALASTAIR UND RICHARD FITTER, SCIENCE

Entkopplung von Artenzyklen

Nicht so sehr der erwartete Rückgang der Meisen im Hoge-Veluwe-Park sei das eigentlich Beunruhigende, kommentiert Visser den Befund. Viel schlimmer sei, dass anderen Arten vermutlich genauso Gefahr drohe. Würde man andere Nahrungsketten untersuchen, fände man mit Sicherheit oft ähnliche Entkopplungen. Zu fürchten sei, dass Ökosysteme generell in solcher Weise gegenüber Klimaveränderungen anfällig sind.

Ähnliche Schwachstellen entdeckte der Meeresbiologe David Cushing schon in den 1960er Jahren in ozeanischen Artengeflechten. Bis vor kurzem leitete er die Arbeitsstelle für Fischereiwesen in Lowestoft des britischen Ministeriums für Landwirtschaft, Fischerei und Ernährung. Cushing erklärte die teils starken jährlichen Schwankungen der Heringsbestände. Diese Fische ernähren sich von Plankton. Es dauert mehrere Jahre, bis die Jungfische so weit herangereift sind, dass sie in riesigen Schwärmen ins offene

▶ **Wissenschaftler um Marcel E. Visser (Foto) vom niederländischen Institut für Ökologie setzen in einem Naturschutzgebiet ökologische Populationsstudien an Kohlmeisen fort, die 1955 begannen. Die Nahrungskette für diese Meisenpopulation droht zu zerreißen, weil die Raupen, mit denen die Brut gefüttert wird, immer früher im Jahr erscheinen.**





BEIDE FOTOS: DANIEL GROSSMAN

Meer ziehen. Wie Cushing erkannte, ist es wichtig, dass die Fischlarven genau zur Zeit der Phytoplanktonblüte schlüpfen. Dann überleben besonders viele von ihnen und erreichen die Geschlechtsreife. Decken sich die beiden Ereignisse nicht – Cushing nannte das »mismatch« –, gibt es aus dem Jahr später wenig Heringe.

Etliche Wissenschaftler, die sich mit den Folgen der Klimaerwärmung befassen, haben diesen Ansatz aufgegriffen. So einfach er im Grunde erscheint, kann er doch Beziehungen in der Natur ganz unterschiedlicher Art verstehen helfen. Im Fall der Kohlmeisen und Spannerraupen betrifft es ein Räuber-Beute-Verhältnis, bei dem es auf das zeitliche Zusammentreffen ankommt. Auch in der Beziehung dieser Raupen zu ihrer pflanzlichen Nahrung ist die zeitliche Deckung das Entscheidende. Des Weiteren lässt sich das Konzept auf Beziehungen zwischen Pflanzenarten anwenden. Verschiebt sich etwa der Blühbeginn nicht bei allen in gleicher Weise, kann das die Konkurrenzverhältnisse um Licht, Nährstoffe und Wasser verändern – was tief greifende Auswirkungen hätte.

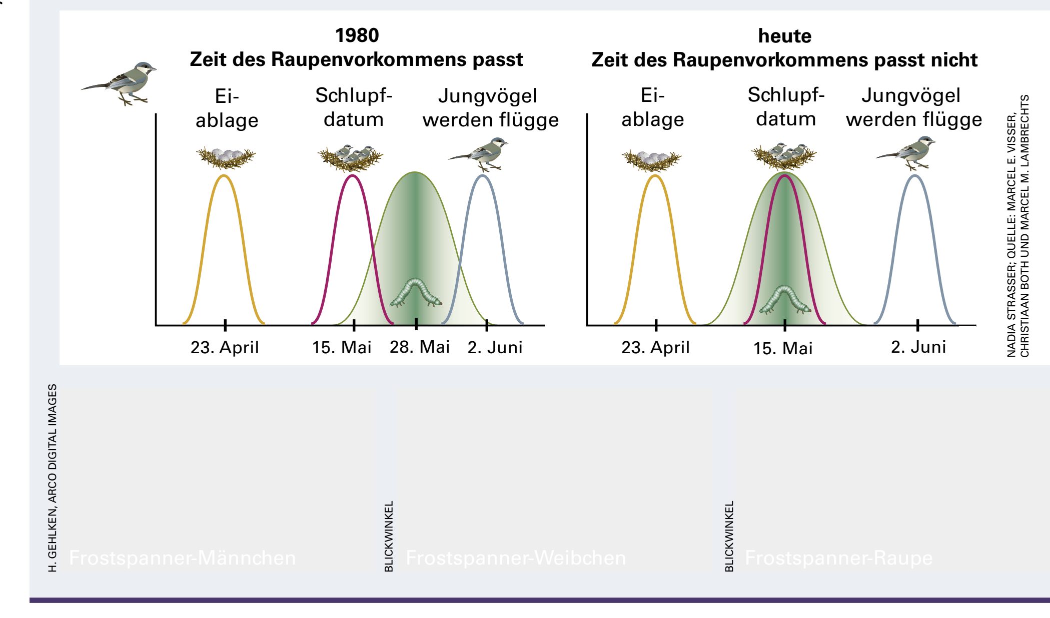
Nicht zuletzt kommt es auch in der Beziehung einer Art zur physikalischen Umwelt darauf an, dass die Verhältnisse zu den Ansprüchen des Organismus passen. So treffen Wanderdrosseln, die in Colorado in hohen Lagen nisten, eher in den Brutgebieten ein als früher. Dann liegt dort noch Schnee, und sie müssen mit dem Eierlegen länger warten.

Wenn sich infolge der Klimaerwärmung die Glieder einer Nahrungskette zeitlich entkoppeln, hängt das oft damit zusammen, dass sich die einzelnen Organismenarten in ihren Rhythmen und Zyklen nach unterschiedlichen Kriterien in der Außenwelt richten. So reagieren manche Organismen etwa auf die durchschnittliche Temperatur der letzten Tage, andere vielleicht auf Temperaturextreme wie Kälteeinbrüche.

Auch in dem System Kohlmeise-Frostspanner-Eiche hängt das Verhalten der Beteiligten von der Umgebungstemperatur ab. Nur bewertet jede Art dabei andere Aspekte. Was die Meisen betrifft, so liegt der Schlüpftermin mit dem Datum des Eierlegens, einen Monat vorher, fest. Hierbei orientieren sich die Vögel an der Temperatur im zeitigen Frühjahr – und die hat sich in den letzten dreißig Jahren in dem niederländischen Nationalpark wenig verändert, ganz anders als die Wärmegrade im späten Frühjahr. Das Schlupfdatum der Raupen wiederum bestimmt sich offenbar einerseits aus der Zahl der Frosttage im Winter und Vorfrühling, andererseits aus der Temperatur im Spätwinter und in den ersten Frühlingswochen. Die Zahl der Frosttage ist in den letzten Jahrzehnten zwar gleich geblieben, doch die Spätwinter sind wärmer geworden. Wann die Eichen ausschlagen, scheint unter anderem von der Temperatur im Spätfrühling abzuhängen. Diese Phase ist heute zwei Grad wärmer als 1980. ▷

Nahrungsnetz aus dem Takt

Die Kohlmeisen in dem niederländischen Hoge-Veluwe-Nationalpark füttern ihre Jungen hauptsächlich mit Frostspannerraupen. In den 1980er Jahren schlüpften diese Raupen Ende Mai. Inzwischen erscheinen sie schon Mitte des Monats. Der Grund: Die Eichen schlagen wegen der im mittleren Frühjahr gestiegenen Temperaturen rund zehn Tage eher aus, und die jungen Blätter stellen in dem Gebiet die Hauptnahrung der Raupen dar. Die Kohlmeisen scheinen aber nicht früher brüten zu können. Bei der Eiablage orientieren sie sich an den Temperaturen im zeitigen Frühjahr, die kaum angestiegen sind.



NADIA STRASSER; QUELLE: MARCEL E. VISSER, CHRISTIAAN BOTH UND MARCEL M. LAMBRECHTS

H. GEHLKEN, ARCO DIGITAL IMAGES — Frostspanner-Männchen

BLICKWINKEL — Frostspanner-Weibchen

BLICKWINKEL — Frostspanner-Raupe



GALEN ROWELL, CORBIS; EINKLINKER: JOHN CONRAD, CORBIS

Die Kolonien der Adeliepinguine der antarktischen Halbinsel drohen in den nächsten Jahrzehnten wegen des wärmeren Klimas auszusterben.

Fatal kann eine Klimaverschiebung für Tierarten wie die Zugvögel sein, die zwischen weit auseinander liegendem Winter- und Sommerquartier wechseln. Häufig haben diese Tiere in langen Zeiträumen Reaktionen auf Umweltsignale am einen Ort herausgebildet, die sie zur rechten Zeit von dort aufbrechen lassen. Solche Signale passen heute manchmal nicht mehr gut, denn der Klimawandel hat nicht überall das gleiche Ausmaß. Generell sind die Temperaturen näher am Äquator viel weniger gestiegen als in höheren Breiten.

Ohnehin verlaufen auch die jährlichen Klimaschwankungen in so weit voneinander entfernten Gebieten oft nicht zeitlich synchron. Viele Zugvögel, deren Winterquartier in Äquatornähe liegt, orientieren sich beim Aufbruch von dort denn auch nicht an der Temperatur, sondern an der Tageslänge.

Solche Arten treffen neuerdings im Brutgebiet verspätet ein. Christiaan Both von der Universität Groningen in den Niederlanden hat das in Zusammenarbeit mit Marcel Visser beim Trauerschnäpper aufgewiesen. Dieser Vogel muss von seinem Winterquartier im tropischen Westafrika bis zum Hoge-Veluwe-Nationalpark 5000 Kilometer weit fliegen. Wie die Kohlmeisen füttert er seine Jungen hauptsächlich mit Raupen. Obwohl die nun einen halben Monat früher am häufigsten auftreten als noch vor zwanzig Jahren, kehren die Trauerschnäpper praktisch am selben Tag zurück wie schon um 1980, eben weil sie in Afrika immer noch zur gleichen Zeit abfliegen.

Die Trauerschnäpper kompensieren den Zeitverzug großenteils, indem sie nach ihrer Ankunft im Sommerquartier vor dem Brüten eine um rund zehn Tage kürzere Ruhephase einlegen als um 1980. Das reicht aber offenbar für viele von ihnen nicht aus, um noch vom Populationsmaximum der Raupen zu profitieren. Die Folgen sind sichtbar: Unter den Vogelpaaren ziehen nur diejenigen kräftige, gesunde Junge heran, die am frühesten brüten. Der Nachwuchs von später brütenden Paaren entwickelt sich eher kümmerlich, und ein großer Teil davon kehrt im nächsten Jahr nicht zurück.

Schwund der Zugvögel als Warnsignal

Die Trauerschnäpper nisten bereits nicht mehr in Wäldern mit sehr frühem Raupenvorkommen. Laut Both hat die Zahl dieser Vögel bislang zwar nicht merklich abgenommen. Der Forscher fürchtet aber, dass dies eintritt, wenn sich das Klima weiter erwärmt. Vermutlich sei der Spielraum, um die verlorene Zeit zu kompensieren, schon jetzt erschöpft. Noch mehr könnten die Vögel die Ruhephase nach der Ankunft wohl nicht verkürzen.

Bei einer Reihe von europäischen Zugvögeln verzeichnen Ornithologen in letzter Zeit einen Schwund. Both und Visser halten es für möglich, dass als Ursache dafür ähnliche Zusammenhänge wie bei den Trauerschnäppern zumindest beteiligt sein könnten.

Zwar erkennen Ökologen bereits viele Warnsignale dafür, dass Komponenten von Ökosystemen wegen der Klimaerwärmung aus dem Takt zu geraten drohen. Ernstliche Schäden an einer Tier- oder Pflanzenpopulation, die offensichtlich auf eine Temperaturverschiebung zurückgehen, wurden bisher aber nur in Einzelfällen beobachtet. Ein drastisches Beispiel liefert der Pinguinforscher William Fraser von der Montana State University in Bozeman. Seinen jahrzehntelangen Beobachtungen zufolge werden die vielen Brutkolonien des Adeliepinguins an der Westküste der Antarktischen Halbinsel in den nächsten fünfzehn Jahren verschwinden. Die Zahl der Brutpaare dieses an sich in der Antarktis sehr häufigen Vogels ist dort auf einer Reihe von Inseln nahe dem amerikanischen Forschungsstützpunkt Palmer Station in den letzten dreißig Jahren um siebzig Prozent zurückgegangen. Unter anderem gibt Fraser dem vielen Schnee die Schuld daran.

Die Wintertemperaturen sind in diesem Teil der Antarktis in den letzten fünfzig Jahren um fast sechs Grad gestiegen. Eine so starke Erwärmung registrierten Forscher kaum irgendwo sonst. Die Folge ist, dass es viel mehr schneit als früher. Denn die Eisbedeckung des Meeres ging zurück, die Luft kann über der offenen Wasserfläche mehr Feuchtigkeit aufnehmen – und die gibt sie dann als Schnee wieder ab.

Fraser verzeichnete die größten Pinguinverluste in Kolonien an den von der Hauptwindrichtung abgekehrten Südhängen. Besonders dort häufen die Winterstürme Schneeverwehungen an. Dieser Schnee schmilzt im südlichen Frühjahr als Letztes, unter anderem weil die Hänge im Schatten liegen.

An sich brüten Adeliepinguine auf kahlem Fels. Darauf errichten sie ihre Nester aus großen Kieseln. Wenn sie im Oktober vom Meer auf die Inseln der Antarktischen Halbinsel zurückkehren, müssen sie eigentlich gleich mit dem Brutgeschäft beginnen. Offensichtlich folgen sie dabei einem strengen inneren Zeitplan. Auf verschobene Jahreszeiten scheinen sie sich nicht einstellen zu können. Finden sie keinen nackten Fels, dann versuchen sie manchmal auf dem

Schnee zu nisten. Doch wenn es schließlich taut, ziehen die Eier Wasser und verfaulen.

Zwar schwanken die Niederschlagsmengen von Jahr zu Jahr, und nicht jeder Sommer endet für die Brut katastrophal. Frasers langjährige Beobachtungen ergaben aber, dass in den Kolonien immer weniger neue Brutpaare auftauchen. Der Schwund ist so beträchtlich, dass diese Populationen sich vermutlich nicht mehr lange werden halten können. Nach Frasers Einschätzung wird sich das Phänomen auf immer mehr Kolonien der Region ausweiten, wenn sich die Temperaturen weiter verschieben. Er hält die Adeliepinguine für »extrem empfindliche Indikatoren für klimabedingte Störungen«. Ihr Schicksal könnte ein Zeichen dafür sein, dass auch anderswo wichtige Veränderungen stattfinden. Die Vögel seien »ein weiterer Beweis dafür, dass sich unser Planet verändert«.

Das Schicksal der Adeliepinguine von der Antarktischen Halbinsel wird einem Großteil der Tier- und Pflanzenarten andernorts wahrscheinlich erspart bleiben. Generell glauben die Wissenschaftler, dass sich viele Organismen an die veränderten Klimabedingungen anpassen können. Vielleicht wird beispielsweise bei den niederländischen Trauerschnäppern eine Unterart entstehen, die im afrikanischen Überwinterungsgebiet einige Tage eher losfliegt. Christiaan Both untersucht jetzt, ob sich Familienverbände dieser Vögel, die generell früher ziehen als andere, genetisch von den später abfliegenden unterscheiden. Sie könnten einen zukünftig erfolgreichen Zweig begründen.

Verarmung wie nach einer Eiszeit

Eine andere Fraktion betroffener Arten wird sich fast mit Sicherheit nicht auf die neuen Klimaverhältnisse einstellen können. Manchmal sind die ökologischen Beziehungen hierfür zu verflochten. Den Kohlmeisen im Hoge-Veluwe-Nationalpark etwa wäre nicht geholfen, wenn sie einfach mit der Eiablage zwei Wochen früher begännen – auch wenn dann in der Zeit der Jungenaufzucht genügend Raupen zur Verfügung stünden. Der Haken dabei: Die Meisenweibchen müssen sich vorher einen Nährstoffvorrat anfressen. Dazu suchen sie Bäume nach Insekten ab. Das meiste Futter finden sie auf Lärchen und Birken, die sich zwar immer noch – wie früher schon – vor den Eichen begrünen, das Datum allerdings längst nicht so stark vorverlegt haben wie die Eichen. Sollten sich die Zeitpunkte einander noch mehr annähern, bliebe den Meisenweibchen, so sie denn auf die Eichenknospung reagieren würden, eine zu kurze Zeitspanne, um sich die nötigen Energiepolster zuzulegen. Die Kohlmeisen dürfen darum gar nicht deutlich früher zu nisten anfangen.

CORBIS

Seit die Pflanzenwelt früher erwacht, finden viele Singvögel in der Brutzeit nicht mehr genug Nahrung. Hier ein Blick in einen Nationalpark an der nordamerikanischen Westküste.

Manche Arten werden auf einen Klimawandel antworten, indem sie ihren Lebensraum hin zu günstigeren Regionen verschieben. Nachweislich hat eine Anzahl Vögel, Insekten und anderer Organismen ihr Verbreitungsgebiet jetzt schon teilweise beträchtlich nach Norden oder in größere Höhen verlagert – und wie es aussieht, wird sich dieser Trend fortsetzen. So rasch, wie das Vögeln oder Kerbtieren unter Umständen gelingt, können andere Arten des Beziehungsgeflechts, oft insbesondere die Bäume, allerdings nicht nachfolgen.

Wegen solcher Diskrepanzen drohen Ökosysteme auseinander zu reißen, warnt die Biologin Terry Root vom Zentrum für Umweltwissenschaft und -politik an der Universität Stanford (Kalifornien). An deren Stelle würden dann artenärmere Gemeinschaften treten. Menschliche Degradierung und Zerschneidung von Landschaften verschärft die Gefahr der ökologischen Verarmung ohnehin.

In einem zusammen mit Kollegen verfassten Beitrag in der Wissenschaftszeitschrift »Nature« im Januar 2003 nennt die Forscherin Zeichen dafür, dass die globale Erwärmung ihren »Fingerabdruck« an Tieren und Pflanzen hinterlässt. Eine Vorstellung von der zukünftigen Entwicklung könnten Pollenanalysen von Nordamerika vom Ende der letzten Eiszeit geben, führt Terry Root an. Als die Eisgrenze nach Norden zurückwich, dauerte es an sich gar nicht lange, bis Wälder nachfolgten. Dennoch blieben die Lebensgemeinschaften nicht zusammen, denn die einzelnen Arten drangen verschieden schnell vor. So entstanden neue Pflanzen- und Tiergesellschaften. Ähnliches könnte jetzt auch geschehen, vermutet Root. Die globale Erwärmung wird vielleicht völlig neuartige Ökosysteme hervorbringen. Und sicherlich werden manche Organismen dabei untergehen, weil sie in ihnen keinen Platz finden.

Um die Tragweite der beschriebenen Phänomene zu erkennen, bedarf es selbstverständlich noch sehr viel mehr Forschung. Auch widersprüchliche Ergebnisse müssen abgeklärt werden. Zum Beispiel rätselt die Wissenschaft, weshalb die Kohlmeisen im Hoge-Veluwe-Nationalpark in den Niederlanden sich offensichtlich nicht auf das immer frühere Erscheinen der Frostspannerraupen einzustellen vermögen, während das einer Kohlmeisenpopulation in Südengland in der Nähe von Cambridge gelingt.

Fest steht vor allem eines, in den Worten von Alastair Fitter: »Die Natur merkt, was mit dem Klima geschieht.« Und er ergänzt: »Es kommt noch schlimmer.« ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Daniel Grossman ist Wissenschaftsjournalist. Seit siebzehn Jahren schreibt er über Umweltthemen.

Wildlife responses to climate changes: North american case studies. Von Stepen H. Schneider und Terry L. Root (Hg). Island Press, 2002

Rapid changes in flowering time in british plants. Von A. H. Fitter und R. S. R. Fitter in: Science, Bd. 296, S. 1689, 31. Mai 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Explodierende Molekülhaufen

Mit hochintensiven Laserpulsen lassen sich winzige Cluster von Atomen oder Molekülen zur Explosion bringen. Dabei verraten diese ungewöhnlichen Aggregate wichtige Details über den Ablauf chemischer Reaktionen.

Von Lutz Poth, Eric S. Wisniewski und A. Welford Castleman jr.

Beim Wort »Cluster« denken Wissenschaftler je nach ihrer Fachrichtung an höchst unterschiedliche Dinge. Der Strukturchemiker wird ein Polyeder aus Kugeln und Stäbchen vor Augen haben, das eine so genannte Koordinationsverbindung darstellt, während der Astrophysiker damit eine Häufung von Sternen oder Galaxien meint. Informatiker wiederum verstehen darunter zusammengeschaltete Computer. Doch für uns Physikochemiker hat der Ausdruck Cluster eine sehr spezielle Bedeutung. Er bezeichnet eine Ansammlung von schwach gebundenen Atomen oder Molekülen, deren Größenverteilung je nach Herstellungstechnik variiert werden kann. Derart kleine Aggregate verhalten sich nicht wie makroskopische Festkörper, Flüssigkeiten oder Gase; darum betrachtet man sie oft als einen eigenen Aggregatzustand.

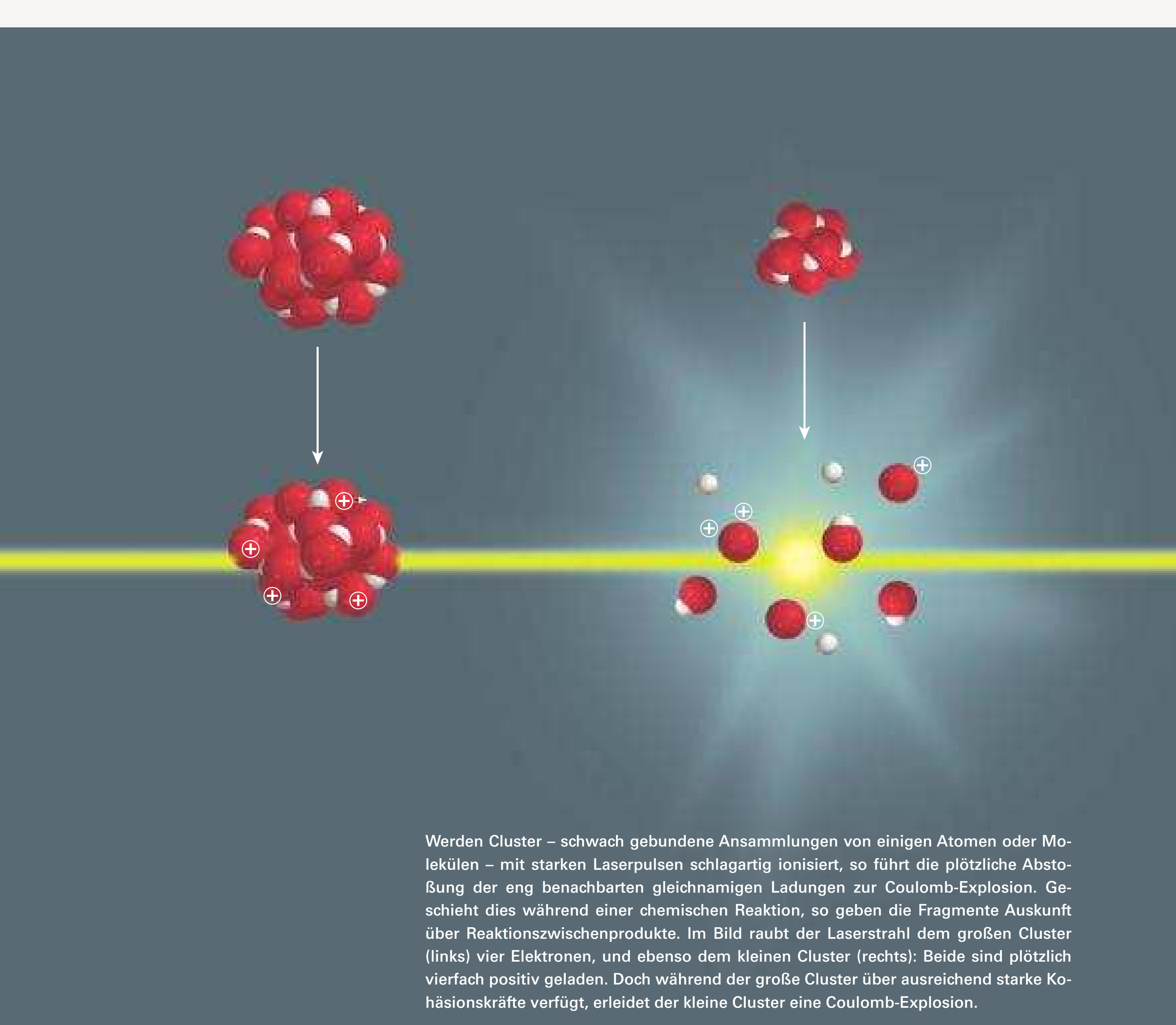
Weil Cluster so klein sind, liegen die Teilchen, aus denen sie sich zusammensetzen, überwiegend an der Oberfläche. Außerdem entstehen auf Grund ihrer geringen Größe diskrete Energiezustände, das heißt typische Quanteneffekte. Das Spannende an der Clusterforschung ist, dass sie einen experimentellen Zugang zu fundamental neuen Phänomenen erschließt. Außerdem schlägt sie, da sie einen Zwischenzustand zwischen Gasen und Festkörpern untersucht, eine Brücke zwischen den beiden. Für praktische Anwendungen könnten Cluster eines Tages in neuen Materialien als winzige Bausteine im Nanometerbereich (millionstel Millimeter) dienen.

Doch bevor sich solche Visionen verwirklichen lassen, muss das einzigartige physikalische und chemische Verhalten der Cluster näher erforscht werden. Da die Prozesse, um die es hier geht, extrem rasch ablaufen, braucht man zur direkten Beobachtung spezielle Techniken. Wir betrachten hier die Clusterdynamik, insbesondere das einzigartige Phänomen der so genannten Coulomb-Explosion.

Gleich und Gleich gesellt sich ungern

Zu den schnellsten chemischen Prozessen zählen die, an denen geladene Komponenten beteiligt sind. Am kürzesten dauern Reaktionen mit Elektronentransfer, doch solche mit anderen geladenen Reaktionspartnern brauchen kaum länger. Uns interessiert vor allem eine Wechselwirkung zwischen ionisierten Atomen oder Molekülen. Auf Grund ihrer elektrischen Ladung beeinflussen ionisierte Partikel einander über vergleichsweise große Entfernungen. Ihre Wechselwirkung ist meist stark und vollzieht sich häufig sehr schnell. Wie die gleichnamigen Pole eines Spielzeugmagneten stoßen sich auch Teilchen gleicher Ladung ab. Wenn nun plötzlich auf engstem Raum eine Ansammlung gleich geladener Teilchen erzeugt wird, kann ihre gegenseitige Abstoßung zu einer regelrechten Explosion führen; sie wird Coulomb-Explosion genannt – nach dem französischen Physiker und Ingenieur Charles Augustin de Coulomb (1736–1806), der als Erster die Gesetze der elektrischen Anziehung und Abstoßung formulierte. Cluster neigen besonders zu solchen Prozessen, wenn sie dem hochintensiven Strahlungsfeld von extrem kurzen Laserpulsen ausgesetzt werden. Das Verhalten während der Coulomb-Explosion liefert Daten über die zeitliche Entwicklung der kurzlebigen Übergangszustände, die im Verlauf einer chemischen Reaktion auftreten.

Wie sich die Abstoßung von gleichen Ladungen in Clustern auswirkt, ist seit Jahren bekannt, aber die Spuren des Vor-



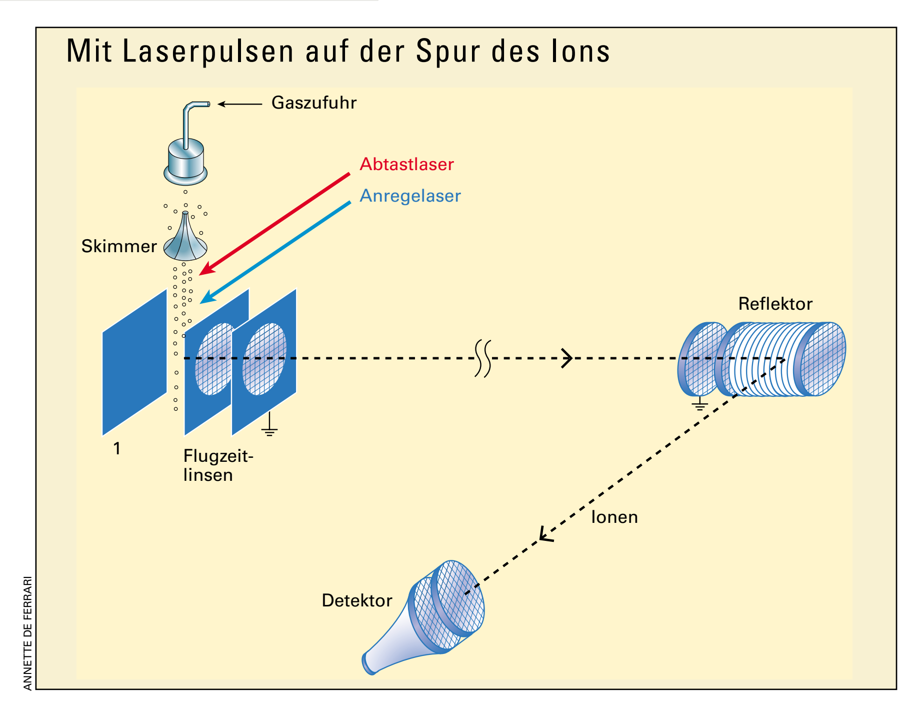
Werden Cluster – schwach gebundene Ansammlungen von einigen Atomen oder Molekülen – mit starken Laserpulsen schlagartig ionisiert, so führt die plötzliche Abstoßung der eng benachbarten gleichnamigen Ladungen zur Coulomb-Explosion. Geschieht dies während einer chemischen Reaktion, so geben die Fragmente Auskunft über Reaktionszwischenprodukte. Im Bild raubt der Laserstrahl dem großen Cluster (links) vier Elektronen, und ebenso dem kleinen Cluster (rechts): Beide sind plötzlich vierfach positiv geladen. Doch während der große Cluster über ausreichend starke Kohäsionskräfte verfügt, erleidet der kleine Cluster eine Coulomb-Explosion.

TOM DUNNE / AMERICAN SCIENTIST

gangs waren zunächst wenig aussagekräftig. Bis vor kurzem wurden Coulomb-Phänomene lediglich in intakten Clustern beobachtet, die so groß waren, dass sie mehr als ein Ladungszentrum trugen und darum in einem Massenspektrometer nachweisbar waren. In diesen Fällen waren die Ladungen so weit voneinander entfernt, dass ihre Abstoßung nicht ausreichte, den Cluster völlig zu sprengen. Hingegen existieren explosive Clustersorten zu kurz für einen Nachweis im Spektrometer. Manchmal konnte man stabile Cluster durch geschicktes Ionisieren und Aufheizen mittels Laser destabilisieren und zum Verdampfen bringen. Dabei entstanden mitunter so kleine Aggregate mit so dicht eingebetteten Ladungen, dass sie einen spaltungsähnlichen Zerfall erlitten. Daran konnte man zwar einige Folgen der Coulomb-Effekte beobachten, aber nicht die eigentliche Explosion.

Mehrfachionisierung durch ultrakurze Laserpulse

Seit Mitte der 1970er Jahre wird die Wirkung starker Laserfelder auf Atome, Moleküle oder Werkstoffe erforscht. Intensive Laserpulse können offenbar Mehrfachionisationen auslösen, indem sie aus einzelnen Atomen zahlreiche Elektronen herausschlagen; allerdings ist der genaue Mechanismus noch umstritten. Mitte der 1980er Jahre wurden durch Ionisierung einzelner neutraler Atome mehrfach geladene Partikel erzeugt wie Helium^{2+} (He^{2+}, ein Heliumatom, dem zwei Elektronen fehlen), Neon^{2+} und Xenon^{5+}. Auf ähnliche Weise gelangte man zu Argon^{8+}, Krypton^{8+}, Europium^{6+}, Ytterbium^{5+}, He^{4+} und sogar Uran^{10+}. Aus dem zweiatomigen Molekül N_2 entstanden in einem intensiven Laserfeld einfach geladener Stickstoff ▷



Das Flugzeitspektrometer misst die Zeit, die ein ionisiertes Teilchen benötigt, um den Detektor zu erreichen. Ein elektrischer Schirm (1) sorgt dafür, dass auch Teilchen, die sich ursprünglich vom Detektor weg bewegen, zu ihm reflektiert werden. Aus der Verzögerung, mit der diese Teilchen beim Detektor ankommen, geht die kinetische Energie der Partikel hervor. Bei Anrege-Abtast-Experimenten setzt der eine Laserpuls die Reaktion in Gang, und ein zweiter – über einen längeren Weg geführter – Puls spürt Femto- bis Pikosekunden (10^{-15} bis 10^{-12} Sekunden) später die Reaktionsprodukte auf.

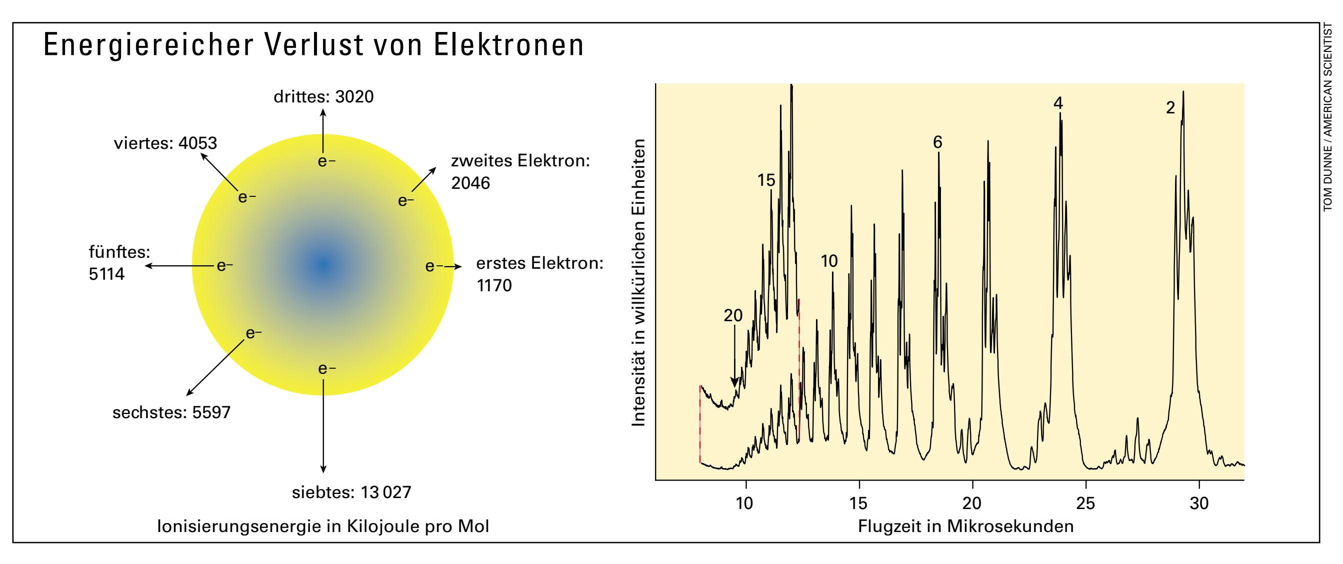
▷ (N^+) sowie die Mehrfach-Ionen N^{2+} und N^{4+}. Die Coulomb-Explosion einzelner Jodwasserstoff-Moleküle (HI) lieferte geladene Jodfragmente bis hinauf zu +5. Auch andere zweiatomige Moleküle wie Kohlenmonoxid, Sauerstoff und Wasserstoff wurden untersucht. Kürzlich ergab die intensive Bestrahlung des Moleküls Uranhexafluorid (UF_6) die Ionen U^+, U^{2+} und U^{3+}.

Vor einigen Jahren beobachteten wir ein unerwartetes Phänomen: Hochintensive Laserpulse erzeugten selbst bei geringem Strahlungsfluss augenblicklich Cluster mit hohen Ladungen. Der Schlüssel zu diesem Effekt war der Einsatz ultrakurzer Laserpulse mit Pulsdauern im Femtosekundenbereich (1 Femtosekunde = 10^{-15} Sekunden). Um solche Zeitspannen zu begreifen, stelle man sich 25 Fußballfelder vor, die ein Meter hoch mit grobem Sand bedeckt sind. Wenn wir nun die Summe all dieser Sandkörner mit einer Sekunde gleichsetzen, dann entspricht eine Femtosekunde einem einzigen Sandkorn – wirklich eine extrem kurze Zeiteinheit! Richtet man einen intensiven Femtosekunden-Puls auf einen Cluster, so gehen fast augenblicklich zahlreiche Elektronen verloren, und es entsteht ein hoch geladenes Aggregat, das sofort explodiert.

Aufschlussreiche Clusterfragmente

Wie neue Experimente zeigen, verhalten sich Moleküle oft völlig anders, sobald sie zu einem Clusterensemble gehören. Gegenwärtig erzeugt man meist gebündelte oder gar gepulste Strahlen von atomaren und molekularen Clustern und setzt sie intensivem Laserlicht aus. Wenn die Coulomb-Explosion die Aggregate dann in atomare und molekulare Fragmente zertrümmert, können die Bruchstücke unterschiedlich starke Ladungen tragen und kinetische Energien bis zu einigen tausend – bei hoher Ladung bis zu

Die zum Entfernen eines Elektrons aus der Atomhülle erforderliche Energie nimmt mit jedem Ionisierungsschritt drastisch zu. Bei Xenon erfordert das Beseitigen des siebten Elektrons gut zehnmal so viel Energie wie das des ersten. Die Autoren raubten dem Xenon mit intensiven, sehr kurzen Laserpulsen bis zu zwanzig Elektronen. Die Zahlen auf den Peaks bezeichnen die Anzahl der entfernten Elektronen.



millionen – Elektronenvolt (eV) erreichen. Mit den heute gebräuchlichen Hochleistungslasern werden bei einer Coulomb-Explosion sogar manchmal Röntgenstrahlen freigesetzt.

Um den Ursprüngen solcher Prozesse auf die Spur zu kommen, ist das Flugzeitmassenspektrometer ein geeignetes Werkzeug. Es misst die Zeit, die ein ionisiertes Teilchen benötigt, um die Strecke zwischen Ionenquelle und Detektor zurückzulegen (Bild auf der linken Seite oben). Bei der Coulomb-Explosion geben die Cluster in alle Richtungen gleichmäßig hoch geladene Atome ab, aber gemessen werden nur die Atome, die sich längs der Achse des Massenspektrometers bewegen. Wir richten unser Flugzeitspektrometer so ein, dass auch die Partikel, die sich vom Detektor fort bewegen, elektrisch zu ihm reflektiert werden. Sie müssen dabei einen weiteren Weg zurücklegen als jene, die direkt zum Detektor wandern, und kommen deshalb später dort an.

Der Unterschied in den Ankunftszeiten ist ein Maß für die Abstoßungskraft im Moment der Explosion und für die kinetische Energie der Fragmente. In deren Massenspektren erscheinen die Coulomb-Explosionen als deutliche Spitzen. Die bei der Explosion direkt zum Detektor hin ausgestoßenen Ionen erzeugen ein breites Signal bei einer frühen Ankunftszeit, während die entgegengesetzt emittierten und reflektierten Ionen etwas später ankommen und einzelne scharfe Peaks verursachen (Bild S. 67 oben).

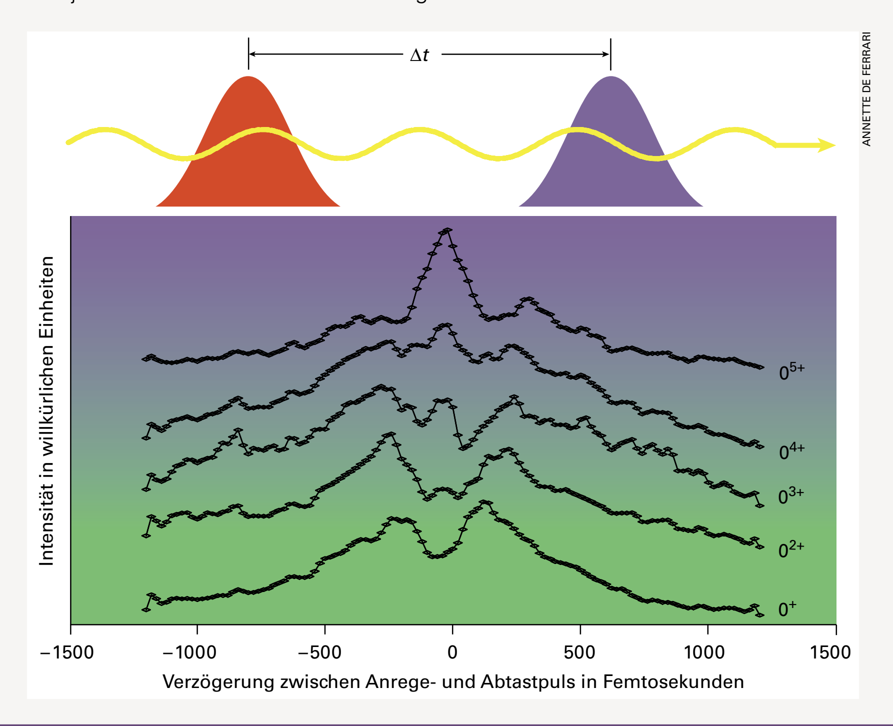
Solange die Laserleistung nicht ausreicht, zahlreiche Elektronen herauszuschlagen, finden sich in den Massenspektren von Ammoniakmolekülen lediglich ionisierte Moleküle (NH_3^+); erst bei höherer Leistung erscheinen einige mehrfach geladene Stickstoffatome sowie H^+-Ionen. Werden hingegen nicht separate Moleküle – »Monomere« –, sondern Ammoniak-Cluster in intensiven Laserfeldern ionisiert, nimmt die Produktion mehrfach geladener Stickstoffionen deutlich zu und es wird viel mehr kinetische Energie frei. Zusätzlich entstehen intakte Clusterionen, die durch so genannte Kovarianzanalyse – ein statistisches Verfahren, das von den physikalischen Eigenschaften von Produkten auf ihre gemeinsame Herkunft schließt – einem bestimmten Ursprungscluster zugeordnet werden können.

Wie hochionisierte Fragmente entstehen

Im Anrege-Abtast-Experiment wird je nach der Verzögerung Δt zwischen Anrege-Laserpuls (blaue Glockenkurve oben) und Abtastpuls (rote Glockenkurve) der Ablauf einer Coulomb-Reaktion anhand unterschiedlicher Fragmenttypen deutlich. Hier entstehen bei der Coulomb-Explosion von Aceton-Clustern mehrfach ionisierte Sauerstoffatome (O^+ bis O^{5+}). Zwei Details ihrer Spektren unterstützen das so genannte Ionisationszündungsmodell; es erklärt die Bildung ungewöhnlich hoch geladener Fragmente nach einer Coulomb-Explosion durch Wechselwirkung mit bereits vorhandenen Ionenkernen.

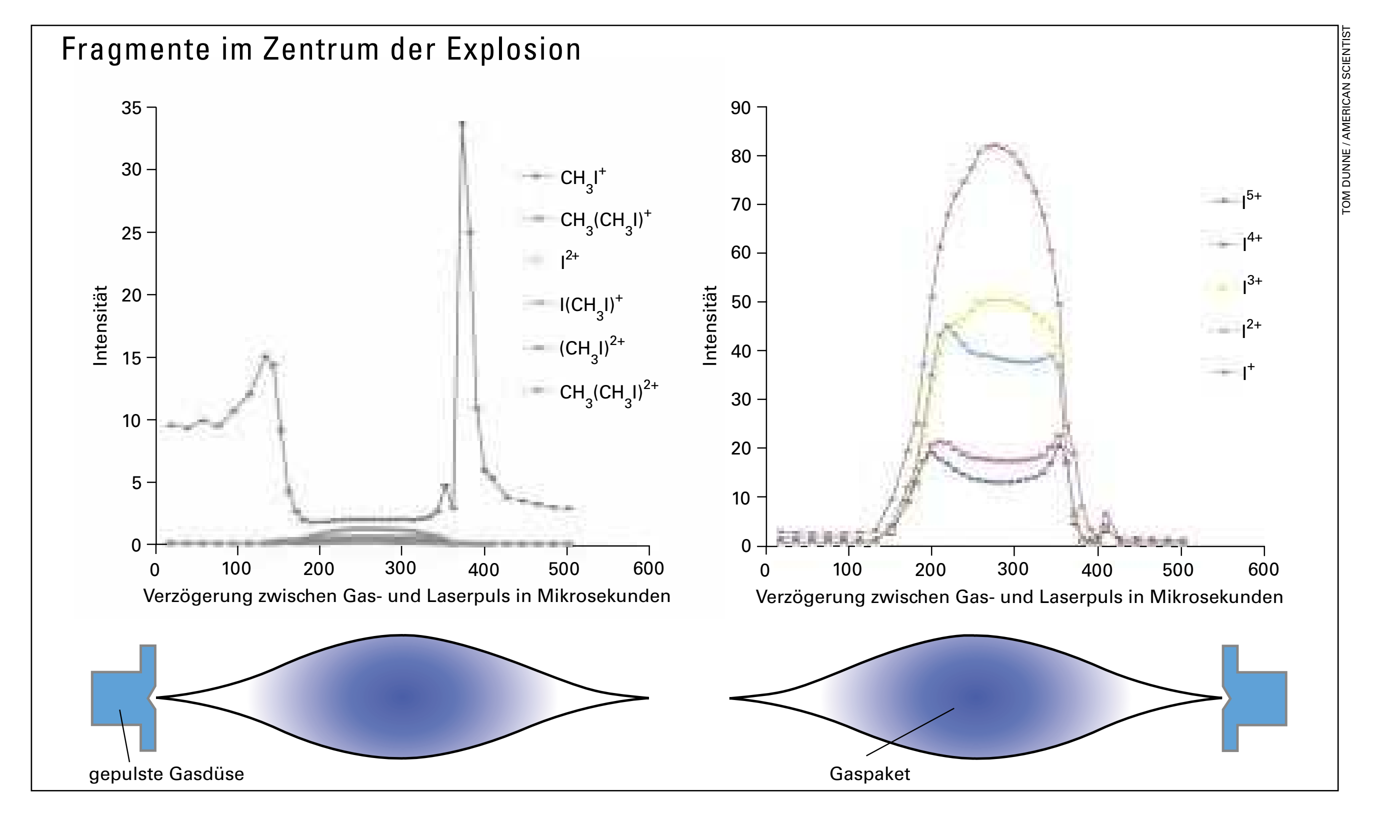
Erstens erkennt man bei Verzögerung null eine tiefe Delle in der O^+-Kurve, die sich jedoch mit zunehmender Ionisierung hochstülpt und schließlich bei der O^{5+}-Kurve in einen scharfen Peak verwandelt. Das stützt die Annahme, dass die enge Nachbarschaft bereits stark ionisierter Teilchen die Ionisation begünstigt.

Zweitens gibt es bei langen Verzögerungszeiten, insbesondere bei den höher geladenen Teilchen, eine Art Schwebungsmuster, das auf Ladungsresonanz-Ionisation schließen lässt – das heißt auf einen Quanteneffekt, bei dem die Ionisationsrate in nichtlinearer Weise vom Abstand zwischen den Kernen abhängt. Da die Kernabstände mit wachsender Verzögerungszeit zunehmen, ändert sich die lokale Wellenfunktion und somit die Ionisationsrate des betreffenden Ladungszustands.



Ähnlich wie die Ammoniak-Cluster erzeugen auch HI-Cluster sowie kombinierte HI-Argon-Cluster bei Bestrahlung mit Femtosekunden-Laserpulsen hoch geladene Jodatome bis zu I^{17+} und Argonatome bis zu Ar^{8+}. Überraschenderweise verlieren diese beiden Atome ihre gesamten Valenzelektronen. Der Kovarianzanalyse zufolge gehen die I^{n+}-Ionen aus der Coulomb-Explosion von HI-Clustern hervor, während die Ar^{n+} von explodierten HI-Ar-Clusterkombinationen stammen. Bei diesen Reaktionen werden kinetische Energien von mehreren hundert eV frei. Um die Rolle der Cluster direkter nachzuweisen, kann man den Zeitpunkt variieren, zu dem Laser- und Molekularstrahl sich kreuzen. Dadurch wird es möglich, gezielt nach einem Zusammenhang zwischen der Art der geladenen Teilchen und dem Auftreten von Clustern zu suchen. Wie sich zeigt, treten bei mäßiger Laserleistung tatsächlich die meisten hoch geladenen Ionen genau dann auf, wenn im Molekularstrahl Cluster vorherrschen.

Für die mehrfach geladenen Fragmente, die beim Bestrahlen von Mole- ▷



Bei der Coulomb-Explosion gepulster Pakete von Methyljodid entstehen aus den Clustern stark ionisierte Teilchen. Weil sich die Cluster vorwiegend im Zentrum des Pakets ausbilden, treten die für Coulomb-Explosionen typischen ionisierten Fragmente nur in der Mitte des Pulses auf (rechts). Hingegen zeigen sich ionisierte Moleküle von nicht geclusterten Methyljodid-Paketen vorwiegend am Anfang und am Ende des Pulses (links).

külen oder Clustern mit starken optischen Feldern entstehen, kommen zwei verschiedene Ionisationsmechanismen in Frage. Das Modell der kohärenten Elektronenbewegung (*Coherent Electron Motion Model*, CEMM) postuliert, dass durch Feldionisation freigesetzte Elektronen sich kollektiv wie Quasiteilchen verhalten und auf diese Weise die Anzahl der Ionisationsereignisse erhöhen. In diesem Modell wird die Bildung hoch geladener Ionen mehr oder weniger durch Elektronenstöße erklärt.

Warum die hohe Ladung?

Die Alternative heißt Ionisationszündungsmodell (*Ionization Ignition Model*, IIM). Demnach entstehen hochionisierte Zustände, weil die Ionisierungsschwelle durch bereits in nächster Nachbarschaft vorhandene Ionenkerne abgesenkt wird. In diesem Modell unterliegen die Elektronen der so genannten Ladungsresonanz-Ionisation (*Charge-Resonance Ionization*, CREI), die sehr stark vom Abstand zwischen den Kernen abhängt. Demnach gehen bei der Ionisation mit wachsenden Kernabständen sukzessive Elektronen verloren. Eine Variante namens dynamische Ladungsresonanz-Ionisation berücksichtigt zusätzlich das Zeitverhalten des Laserpulses und seine Kopplung an die Kernbewegungen im Cluster.

In unserem Labor führten wir an Aceton-Clustern so genannte Anrege-Abtast-Versuche *(pump-probe experiments)* durch: Ein Femtosekunden-Laserpuls einer bestimmten Wellenlänge regt das System an und unmittelbar danach wird mit Laserlicht einer anderen Farbe das Massenspektrum des Systems analysiert. Dabei zeigten sich typische zeitliche Oszillationen in der Bildung mehrfach geladener Kohlenstoff- und Sauerstoffatome durch Coulomb-Explosion. Dies spricht für den Mechanismus der Ladungsresonanz-Ionisation und somit für das Ionisationszündungsmodell (siehe Kasten auf der vorigen Seite).

Allerdings stützen andere Indizien, die vor allem auf den kinetischen Energien der mehrfach geladenen Fragmente (zwischen einigen zehn und hunderten eV) beruhen, beide Modelle gleichermaßen. Viele Forscher glauben jetzt, dass das Ionisationszündungsmodell für kleine Clustersysteme gilt, während das Modell der kohärenten Elektronenbewegung auf große Aggregate zutrifft, deren Größe ungefähr der Wellenlänge des verwendeten Laserlichts entspricht.

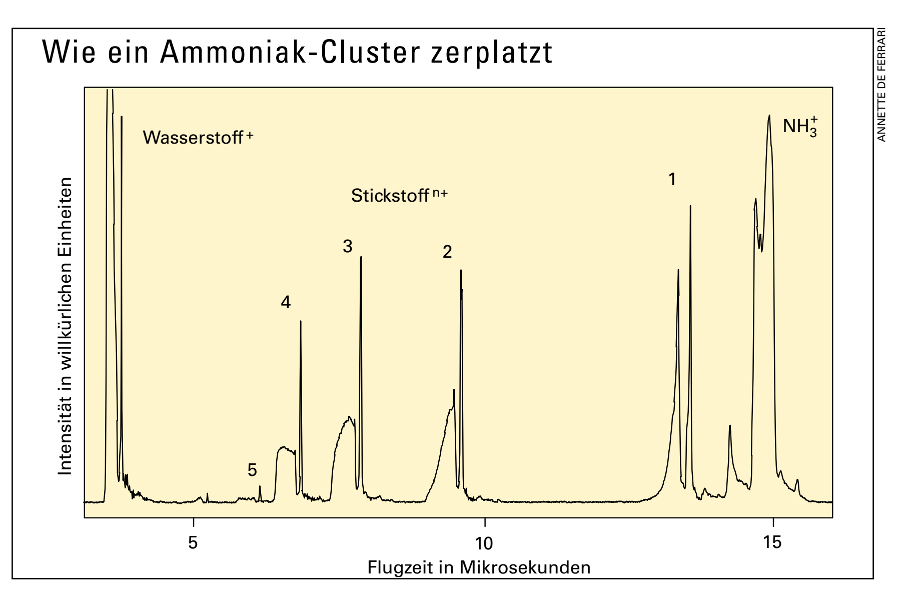
Femtochemie: Momentaufnahmen chemischer Prozesse

In allen Chemielehrbüchern wird beschrieben, wie chemische Reaktionen zwischen Reaktanden zur Bildung von Produkten führen. Dabei konzentriert sich die Darstellung auf die Reaktionskinetik, die im Wesentlichen verfolgt, wie sich die Konzentrationen von Ausgangsstoffen und Endprodukten zeitlich verändern.

Obwohl wir damit wertvolle Informationen erhalten, erfahren wir wenig darüber, wie sich Anlagerung und Dissoziation auf molekularer Ebene vollziehen. Zudem werden die wichtigen Übergangszustände völlig ignoriert. Um chemische Reaktionen vollständig zu verstehen, würden wir gern in Echtzeit verfolgen können, wie Bindungen wirklich aufbrechen und sich neu bilden. Dies ist erst seit ungefähr einem Jahrzehnt möglich.

Die Schnelligkeit und der Größenmaßstab chemischer Reaktionen machen

Wenn Ammoniak-Monomere und -Cluster durch intensive Laserpulse zur Coulomb-Explosion gebracht werden, erzeugen nur die Cluster mehrfach geladene Stickstoffatome – mit Ankunftszeiten von 5 bis 10 Mikrosekunden (10^{-6} Sekunden). Das Monomer (mit einer Ankunftszeit von rund 15 Mikrosekunden) wird zwar ionisiert, zerplatzt aber nicht in Stickstoff- und Wasserstofffragmente. Die Zahlen bezeichnen den Ionisationsgrad des Stickstoffs.



das Vorhaben extrem schwierig. Atome bewegen und binden sich billionenfach schneller als ein Lidschlag. Um atomare Bindungen von einigen Nanometern Länge und Kernbewegungen von rund tausend Metern pro Sekunde zu erfassen, muss die zeitliche Auflösung des Beobachtungsapparats bei wenigen Femtosekunden liegen.

Erst seit die optische Physik ultraschnelle Lasertechniken hervorgebracht hat, konnten Chemiker daraus Werkzeuge zur direkten Beobachtung entsprechend kurzer Prozesse entwickeln. In der Femtochemie, für deren Grundlegung Ahmed Zewail 1999 den Chemie-Nobelpreis erhielt, werden chemische Reaktionen mit Anrege-Laserpulsen passender Energie in Gang gesetzt; dann wird der Verlauf der Reaktion durch Fluoreszenz oder Ionisation mittels entsprechend verzögerter Abtastpulse untersucht (siehe Spektrum der Wissenschaft 12/1999, S. 12).

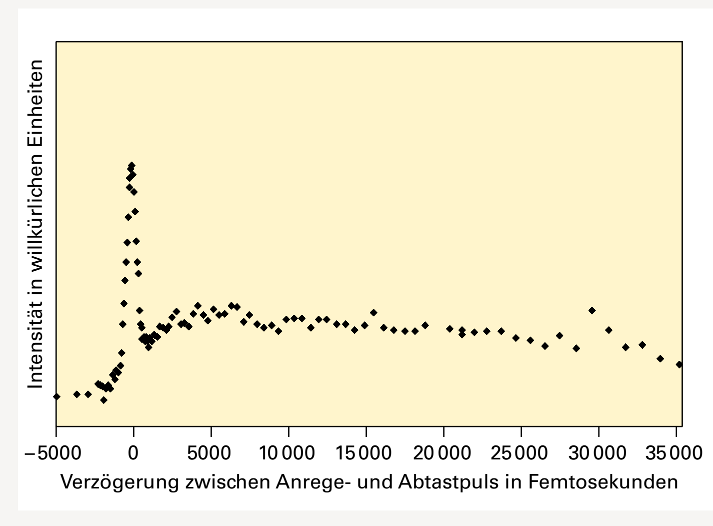
Die Femtochemie von Clustern ist besonders interessant, weil ihre Übergangszustände oft länger andauern. Zum Beispiel macht es einen deutlichen Un- ▷

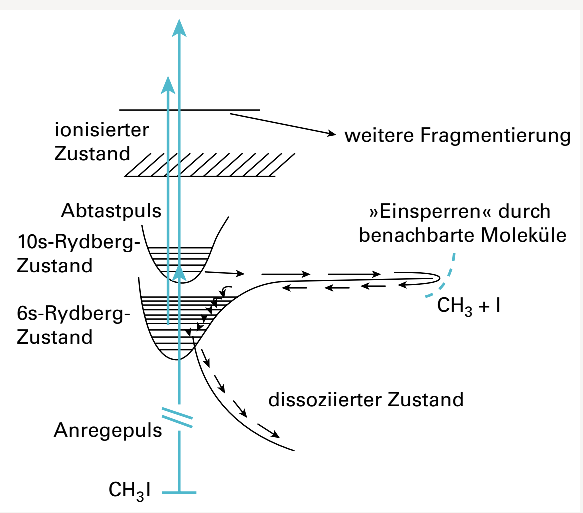
Details einer chemischen Reaktion

Durch Variation der Verzögerungszeit des Abtastpulses entsteht ein detailliertes Bild einer Reaktion. Die Kurve (links) zeigt den Anrege-Abtast-Verlauf bei Methyljodid; die variierende Intensität weist auf Zwischenzustände hin, die rechts skizziert sind.

Zunächst wird das Methyljodid durch den Anregepuls in den 10s-Rydberg-Zustand versetzt. Dessen Lebensdauer ist im Cluster verlängert, weil die Energieniveaus durch die Nähe zu den anderen Molekülen im Cluster verschoben sind und der Rydberg-Zustand schwächer an den dissoziativen Zustand gekoppelt ist. Nach ungefähr 5000 Femtosekunden wird das Signal wieder stärker: Der Rydberg-Zustand dissoziiert schließlich doch und es entstehen angeregte Jodatome. Sie werden aber durch Energieaustausch mit benachbarten Molekülen quasi eingesperrt. Durch dieses »*Caging*« am Entkommen gehindert, rekombinieren die Jodatome wieder und es entsteht Methyljodid im niedrigeren 6s-Rydberg-Zustand. Die Ionisierung von Molekülen in diesem Zustand verursacht ein erhöhtes Ionensignal bis zu Verzögerungszeiten um die 60 Pikosekunden.

Letztlich verlieren die Methyljodid-Moleküle durch innere Schwingungen sukzessive doch so viel Energie, dass ihr Zustand sich mit dem Dissoziationszustand kreuzt und sie endgültig dissoziieren.





terschied, ob ein einzelnes Methyljodid-Molekül – ein Momomer – oder ein Cluster aus zwei Molekülen – ein Dimer – auf denselben elektronischen Zustand angeregt wird (Bild S. 66). Insbesondere unterscheiden sich die Verlaufskurven der Methyljodid-Ionen, die aus den Dimer-Clustern stammen, deutlich von denen für Monomere. Durch Messungen bei verschiedenen Verzögerungszeiten können wir verfolgen, was dabei im Einzelnen geschieht (siehe Kasten auf der vorigen Seite).

Wir wollten aber nicht nur den Mechanismus der Coulomb-Explosion verstehen, sondern auch praktische Anwendungen finden. Insbesondere versuchten wir, mit selektiv eingesetzten Coulomb-Explosionen die Abfolge der Zwischenprodukte einer schnellen chemischen Reaktion zu erforschen.

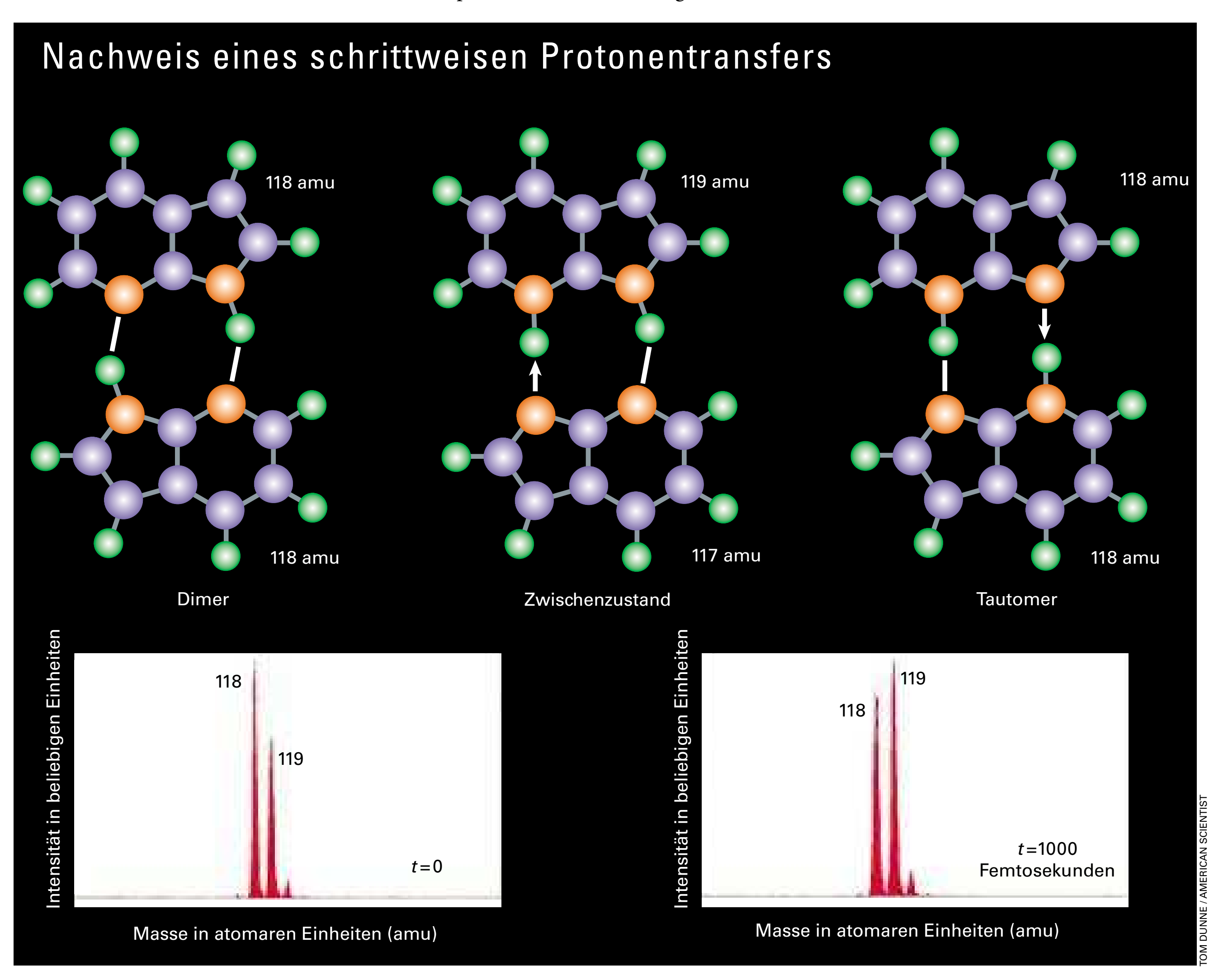
Arretierte Zwischenzustände

Nach Beginn der Reaktion lösten wir mit einem hochintensiven Abtastpuls zu bestimmten Zeiten Coulomb-Explosionen der Reaktionszwischenprodukte aus. Die auf diese Weise festgehaltenen Zwischenprodukte wurden mit einem Flugzeitspektrometer direkt nachgewiesen. Eine besonders interessante Anwendung betrifft eine Hypothese von James Watson und Francis Crick, den beiden Entdeckern der Struktur des Erbmoleküls DNA. Nach ihrer Theorie macht ein Protonentransfer innerhalb von DNA-Basenpaaren diese für Punktmutationen anfällig. Durch den Protonentransfer entsteht ein modifiziertes Basenpaar – ein so genanntes Tautomer –, und infolgedessen wird eine Paarung ungeeigneter Basen wahrscheinlicher.

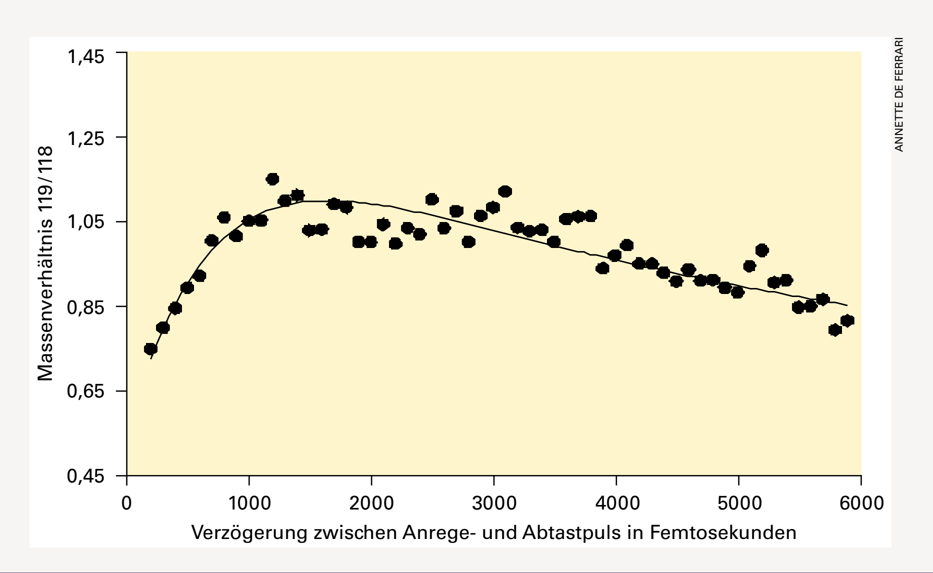
Der Gruppe um Zewail gelang erstmals durch ein Anrege-Abtast-Experiment an einem Modellsystem, dem Dimer von 7-Azaindol, der Nachweis, dass der Protonentransfer schrittweise vor sich geht. Indem wir zu einem bestimmten Zeitpunkt nach Auslösen des Protonentransfers eine Coulomb-Explosion des Reaktionszwischenprodukts auslösten, konnten wir den Vorgang genauer aufschlüsseln (Bild unten).

Es gäbe dabei im Prinzip zwei Möglichkeiten. Im einen Fall bildet sich ein

Die Molekülmodelle zeigen, wie das Dimer von 7-Azaindol durch sukzessiven Transfer von Protonen (grün) über einen Zwischenzustand in eine geringfügig umgruppierte Anordnung – ein Tautomer – übergeht. Indem die Autoren diese Tautomerisierung mittels Coulomb-Explosion anhielten, konnten sie das Zwischenprodukt mit 119 atomaren Masseneinheiten (amu) direkt nachweisen. Die beiden Spektren (unten) zeigen das Verhältnis der Monomere mit 118 und 119 amu zur Zeit null (links) sowie 1000 Femtosekunden nach Reaktionsbeginn (rechts). Der Peak bei 119 amu im rechten Spektrum beweist, dass tatsächlich ein Zwischenzustand auftritt und die Reaktion schrittweise abläuft.



Hoch aufgelöste Reaktionsabläufe



Erst die Coulomb-Explosion des 7-Azaindol-Dimers liefert ein detailliertes Szenario der Tautomerisierung. Das zeitlich variierende Mengenverhältnis der Monomere mit 119 und 118 amu signalisiert einen Protontransfer mit einer Reaktionszeit von rund 600 Femtosekunden, bei dem das Monomer 119 entsteht, sowie einen zweiten, langsameren Protontransfer mit rund 5000 Femtosekunden Reaktionszeit, der es wieder abbaut. Der Nachweis solcher Übergänge gelingt erst, seit die Coulomb-Explosion zeitliche Auflösungen bis zu 20 Femtosekunden ermöglicht.

Zwischenzustand, bei dem zwei Protonen an ein Monomer gebunden sind. Dadurch entstehen Zwischenprodukte mit 119 und 117 atomaren Masseneinheiten (amu, für *atomic mass units*), und die Chance für fehlerhafte Paarungen steigt. In einem zweiten Reaktionsschritt wandert dann das zweite Proton vom Molekültyp mit 119 amu zurück zum 117-amu-Typ und es gibt wieder zwei gleiche Hälften zu je 118 amu. Im anderen Fall läuft der Transfer konzertiert ab – das heißt, die Protonen tauschen gleichzeitig die Plätze. Dann entsteht bei der Bildung des Tautomers kein Zwischenprodukt.

Eine handliche chemische Zeitlupe

Nur durch den Coulomb-Prozess, der Moleküle mit unterschiedlichem Masse-Ladung-Verhältnis binnen 20 Femtosekunden zu trennen vermag, lassen sich die Zwischenprodukte nachweisen. Da das Verhältnis von Fragmenten mit 119 amu zu solchen mit 118 amu mit der Verzögerungszeit zwischen Anregung und Nachweis variiert, ist klar, dass die Tautomerisierung in diesem Modellsystem einem schrittweisen Mechanismus folgt (Bild oben). In ähnlicher Weise wird man, so vermuten wir, die Dynamik einer breiten Palette von Reaktionen bald besser untersuchen können als mit traditionellen ultraschnellen spektroskopischen Methoden.

Am Lawrence Livermore National Laboratory wurde versucht, mittels Coulomb-Explosion die Kernfusion von Deuterium-Clustern nachzuweisen. Daraus könnte eine handliche Neutronenquelle hervorgehen.

Auch für die detaillierte Messung der Struktur von kleinen Molekülen wird die Coulomb-Explosion verwendet. Dabei wird das untersuchte Ion – zum Beispiel CH^{4+} – in einer großen Van-de-Graaff-Maschine auf eine kinetische Energie von 200 000 eV pro amu beschleunigt. Dann trifft es auf eine extrem dünne Targetfolie, wobei es innerhalb einiger hundertstel Femtosekunden sämtliche Bindungselektronen verliert. Die Produkte der nachfolgenden Coulomb-Explosion durchdringen die Folie und werden von einem orts- und zeitauflösenden Detektor nachgewiesen. Aus den Messdaten lässt sich die Struktur des Ausgangsmoleküls ableiten.

In ähnlicher Weise können vermutlich auch kleine Cluster erforscht werden. Da sie eher zur Coulomb-Explosion neigen, reichen schon geringere Energien aus. Kompakte Titan-Saphir-Festkörperlaser liefern immer kürzere Pulse und höhere Pulsenergien, mit denen interessante Probleme in Chemie, Physik und Biologie erforscht werden können (Spektrum der Wissenschaft 11/2000, S. 66).

Durch Laseranregung von Proben auf wohl definierte elektronische Zustände vermag man etwas über die ursprüngliche Anordnung der Kerne herauszufinden, denn die Elektronen gehen viel schneller verloren als die Kerne sich bewegen. Da es immer einfacher wird, auf diese Weise die Struktur und Reaktionsdynamik von Clustern zu untersuchen, dürfen wir in naher Zukunft vielfältige Anwendungen erwarten. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE





Lutz Poth arbeitet als Chemiker in der Abteilung Performance, Pigments and Colors der Ferro GmbH in Frankfurt/Main. Er promovierte an der Technischen Hochschule in Darmstadt und war Postdoktorand bei A. Welford Castleman jr. an der Pennsylvania State University. **Eric S. Wisniewski** promovierte 2002 bei Castleman und ist nun als Chemiker für die US-Regierung tätig. **A. Welford Castleman jr.** ist Professor für Chemie und Physik an der Pennsylvania State University. Zu seinen Schwerpunkten zählt die Erforschung von Clustern als Bausteine für Nano-Materialien.

Femtochemistry and Femtobiology: Ultrafast Dynamics in Molecular Science. Von A. Douhal und J. Santamaria. World Scientific Publishing Company, Singapore 2002

Dynamics of Coulomb Explosion and Kinetic Energy Release in Clusters of Heterocyclic Compounds. Von D. A. Card et al. In : Journal of Chemical Physics, Bd. 116, S. 3554 (2002)

Arresting Intermediate States in a Chemical Reaction on a Femtosecond Time Scale: Proton Transfer in Model Base Pairs. Von D. E. Folmer et al. in: Chemical Physics Letters, Bd. 287, S. 1 (1998)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Wie alt sind die ersten Lebensspuren?

Über die frühesten Zeugnisse von Leben auf der Erde ist ein erbitterter Streit entbrannt. Einst für zuverlässig erachtete Biosignaturen und Fossilien gelten neuerdings als zweifelhaft. Demnach ist das Leben vielleicht doch später entstanden als bisher angenommen.

Von Sarah Simpson

Prähistorische Organismen haben ein Unzahl fossil gewordener Beweise ihrer Existenz in alten Gesteinen hinterlassen. Die gigantischen Oberschenkelknochen schwerfälliger Dinosaurier, die einst in reißenden Flüssen ertranken, lagern heute eingebettet in Sandstein. Zwischen Schichten aus pechschwarzer Kohle prangen in filigranen Details die gezackten Wedel tropischer Farne, die ehemals in morastigen Sümpfen wuchsen. Gewundene Wurmgänge, vor Jahrmillionen in schlammigen Meeresboden gegraben, durchziehen nun stahlgrauen Kalkstein. Diese Hinterlassenschaften des Lebens lassen sich zweifelsfrei von ihren steinernen Ruhestätten unterscheiden. Doch je älter die Organismen, desto unscheinbarer werden ihre Gräber.

Bevor das Leben die Fähigkeit erlangte, Wurzeln in den Boden zu treiben und sich kriechend oder gehend fortzubewegen, bevölkerten nur mikroskopisch kleine Wesen die Erde, die meist aus nicht mehr als einer einzelnen Zelle bestanden. So gut wie alle Spuren dieser Organismen, die vor mehr als 2,5 Milliarden Jahren – im Zeitalter des Archaikums – existierten, sind mittlerweile kaum noch vom umgebenden Gestein zu unterscheiden. Zusammen mit diesem wurden sie meist mehrfach in große Tiefen und wieder zurück an die Oberfläche befördert, was einem wiederholten Kochen unter hohem Druck entspricht. Diese brutale Behandlung haben nur sehr wenige fossilisierte Zellen unbeschadet überstanden. Geologen sind deshalb auf subtilere Spuren des Lebens angewiesen, die sie als »Biosignaturen« bezeichnen. Dazu zählen zum Beispiel Flecken von Kohlenstoffverbindungen, deren chemische Zusammensetzung für einen biologischen Ursprung spricht.

Vor einem Jahrzehnt ermöglichten Hochleistungsmikroskope erstmals feinste Strukturen in irdischen Gesteinen zu entdecken, die wie Einzeller aussahen und erstaunliche 3,465 Milliarden Jahre alt waren. Kaum jemand hatte damit gerechnet, dass uns handfeste Fossilien so nahe an jene Zeit heranbringen könnten, als einfache organische Moleküle sich selbst zu vermehren begannen und damit den Grundstein zum Leben legten. Im Jahr 1996 schienen dann neue Methoden zur Messung feinster Schwankungen in der chemischen Zusammensetzung von Kohlenstoffverbindungen frühere Hinweise zu bestätigen, dass die ersten Orga-



Die Gesteine der Isua-Formation auf Grönland enthalten allgemein akzeptierte Indizien dafür, dass es schon vor mindestens 3,7 Milliarden Jahren lebende Zellen auf der Erde gab – nur rund 800 Millionen Jahre nach der Entstehung des Sonnensystems. Andere sehr alte Lebensspuren in Grönland und Australien – darunter als Mikrofossilien interpretierte, winzige Gesteinseinschlüsse (kleines Bild) – gerieten dagegen kürzlich ins Zwielicht.

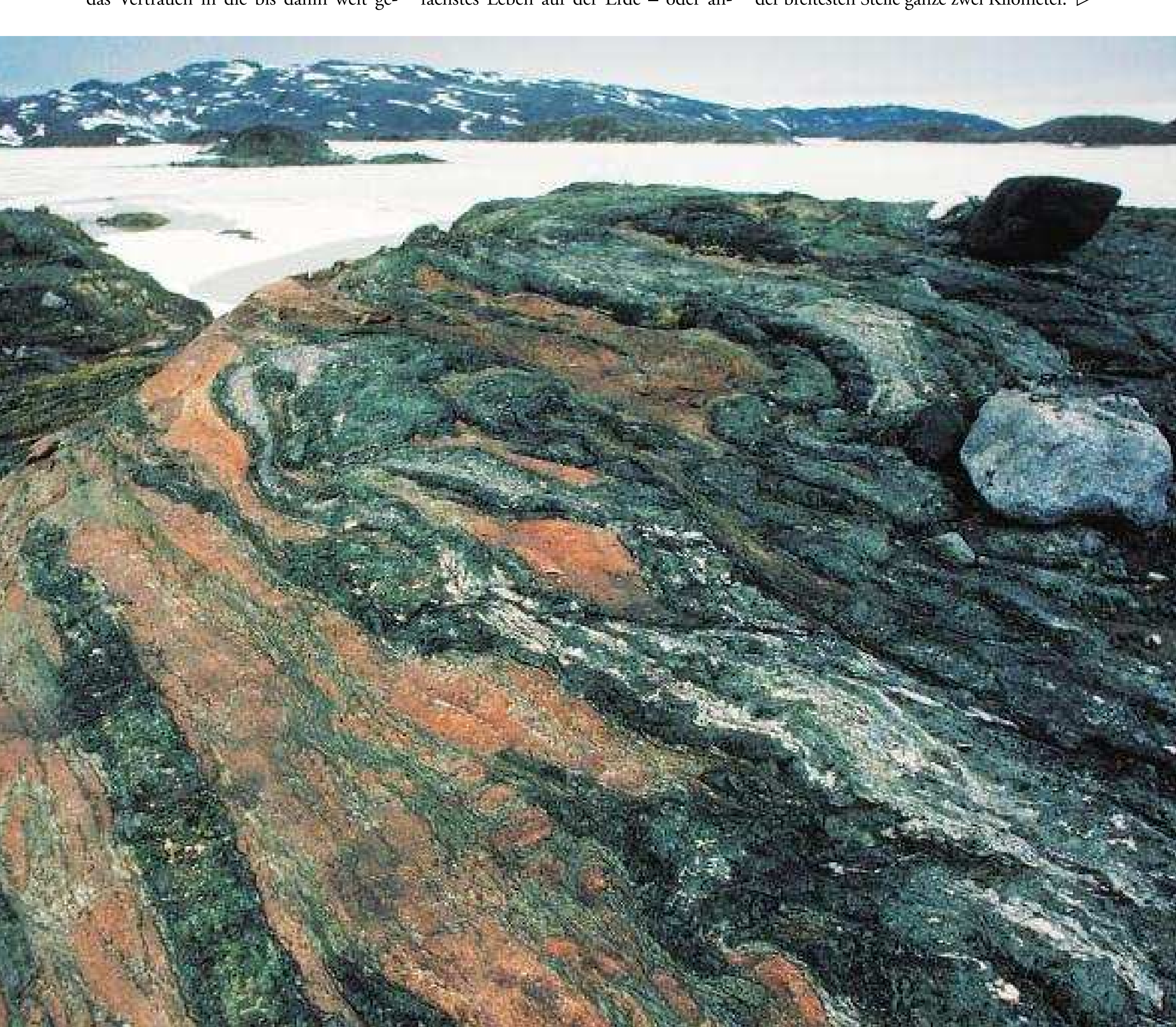
nismen sogar noch 365 Millionen Jahre früher gelebt hatten. Zugleich machte eine weitere frappierende Meldung Schlagzeilen: Ein 3,9 Milliarden Jahre alter Meteorit aus der Antarktis, der nachweislich vom Mars stammte, sollte Biosignaturen und fossile Abdrücke wurmartiger Kreaturen enthalten. Die Wissenschaft lernte, wie es schien, immer besser, die verblassten Zeichen vergangenen Lebens in Gesteinen zu lesen.

Doch der Triumph währte nicht lange. Die angeblichen fossilen Spuren in dem Marsmeteoriten gerieten sofort in die Schusslinie der Skeptiker, und die Liste der Lebenszeichen schnurrte zusammen: Inzwischen gilt nur noch eines überhaupt als erwägenswert (siehe Kasten auf S. 76). Anfang 2002 erhielt auch das Vertrauen in die bis dahin weit gehend akzeptierte Bewertung der irdischen Biosignaturen einen gewaltigen Dämpfer. Eine Serie von Untersuchungen weckte starke Zweifel an der Interpretation zweier Formationen in Grönland und Australien als älteste Fundstätten des Lebens. Neue Einschätzungen der geologischen Verhältnisse legten nahe, dass sich die Gesteine in einem extrem lebensfeindlichen Umfeld gebildet hatten. Andere Forscher fragten sich, ob die besonderen Kohlenstoffspuren und sogar die angeblichen Mikrofossilien vielleicht auch rein chemisch entstanden sein könnten – und damit nicht als Biosignaturen taugten.

Diese Neubewertungen entfachten eine anhaltende Debatte darüber, wie man überhaupt sicher sein kann, einfachstes Leben auf der Erde – oder anderswo im Sonnensystem – zu identifizieren. »Wenn wir das hier nicht schaffen, dann genauso wenig auf dem Mars«, meint der Paläontologe Bruce Runnegar von der Universität von Kalifornien in Los Angeles. Das sollten Weltraumforscher bedenken, die dabei sind, die Analysen von Marsgesteinen durch die Nasa-Sonden Spirit und Opportunity zu interpretieren.

Einmal Hölle und zurück

Der älteste und daher umstrittenste Beleg für frühes Leben auf dem blauen Planeten tauchte vor sieben Jahren in der südwestlichen Ecke Grönlands auf: an der Oberfläche der kalten, öden Insel Akilia. Rund dreißig Kilometer südlich der Hauptstadt Nuuk gelegen, misst sie an der breitesten Stelle ganze zwei Kilometer. ▷



▷ Unter dicken Büscheln von Rentierflechten schimmern dort Bänder milchigen, quarzreichen Gesteins zwischen dunkleren Platten. Letztere konnten Wissenschaftler mit Hilfe von radioaktiven Elementen, die nur in erstarrter Lava vorkommen, auf beachtliche 3,83 Milliarden Jahre datieren. Damit gehören sie zu den ältesten erhaltenen Gesteinen an der Erdoberfläche. Dem glänzenden weißen Material, das selbst keine datierbaren Minerale enthält, schreiben viele Geologen auf Grund seiner Lage sogar ein noch höheres Alter zu.

Akilias starre Landschaft wirkt wie ein Sinnbild der Unvergänglichkeit. Doch die Erde ist ein dynamischer Ort. Die auf Akilia zu Tage tretenden Gesteine haben – wie die meisten aus jener archaischen Epoche – eine der schlimmsten Torturen hinter sich, welche die Geologie zu bieten hat: die Metamorphose. Während 85 Prozent der Zeit, in der die Erde existiert, waren diese Gesteine begraben, wurden zerknautscht, gefaltet oder mit ätzenden Lösungen getränkt. Gewaltsam in Tiefen von fast siebzig Kilometern gezogen, brieten sie bei höllischen Temperaturen von 500 Grad Celsius, bevor sie nach mindestens zwei verschiedenen Hebungsphasen schließlich an die Oberfläche zurückkehrten. Selbst wenn eines dieser Gesteine ursprünglich den Boden eines Ozeans bildete, auf dem sich mikroskopisch kleine Lebewesen tummelten, erscheint es schwer vorstellbar, dass sich darin noch intakte Reste dieser Organismen finden sollten.

Dennoch spürte der Geochemiker Stephen J. Mojzsis, heute an der Universität von Colorado in Boulder, 1996 überraschend einen Hauch vergangenen Lebens inmitten dieser geschundenen weißen Steine auf: Durch das tastende Auge eines Raster-Elektronenmikroskops erspähte er Flecken von Graphit, einer Form von Kohlenstoff, die beim Erhitzen organischer Materie unter Luftausschluss entstehen kann. Zudem stellte er fest, dass widerstandsfähige Apatit-Kristalle den Graphit umhüllten und ihn so möglicherweise vor den schlimmsten Folgen der Metamorphose bewahrt hatten.

Endgültig vom biologischen Ursprung der Flecken überzeugt war Mojzsis, als er zwei Dutzend von ihnen im Detail analysierte und dabei verräterisch »schiefe« Mengenverhältnisse der verschiedenen Kohlenstoff-Isotope entdeckte. Der Anteil der leichtesten und häufigsten Atomsorte mit der Masse zwölf lag durchweg höher als in normalem Gestein. Nun sind Lebewesen wählerisch: Wenn sie Kohlendioxid zum Aufbau von Biomasse mittels Sonnenlicht nutzen, ziehen sie Kohlenstoff-12 dem schwereren Kohlenstoff-13 vor. Dadurch reichert sich das leichtere Isotop an, sodass sein Anteil um etwa zwei bis drei Prozent höher ist als im gelösten Kohlendioxid der Ozeane.

Trügerisches Kennzeichen für Leben

Diese charakteristische Abweichung hatte sich im Verlauf von knapp sechzig Jahren bei Tausenden von Messungen an jüngeren Gesteinen als verlässliches Kennzeichen für Leben erwiesen. Als Mojzsis eine Anreicherung von Kohlenstoff-12 um durchschnittlich 3,7 Prozent in seinen Graphitproben fand, erklärte er dies also besten Gewissens zum eindeutigen Beweis dafür, dass er auf die ältesten irdischen Lebensspuren gestoßen war.

Daraus ergab sich eine weitere Folgerung: Das Leben musste schon begonnen haben, als die Bedingungen auf der Erde noch extrem widrig waren. Zu jener Zeit ließen verheerende Meteoriteneinschläge wiederholt die Ozeane verkochen und hüllten den Planeten für Jahrtausende in einen sengend heißen Nebel aus verdampftem Gestein. Daher feierten viele Geologen – darunter Christopher M. Fedo, heute an der George-Washington-Universität in Washington – die Entdeckung als Schlüssel, der das Tor zu einer bis dahin unbekannten Ära der Erdgeschichte zu öffnen versprach.

Ein Jahr später, also 1997, gehörte Fedo einer Forschergruppe an, die Mojzsis nach Akilia begleitete. Sein erster Eindruck war, »als hätten wir heiligen Boden betreten«, so erinnert er sich heute. Doch fast augenblicklich begannen die beiden jungen Geologen verschiedene Bilder der Vergangenheit zu erblicken – und sich einen anderen Reim darauf zu machen, was das Signal des leichten Kohlenstoffs bedeutete.

Aus der Zusammensetzung der Gesteine und ihren strukturellen Beziehungen hatten Mojzsis und seine Kollegen gefolgert, dass das graphithaltige Material einst in einer relativ lebensfreundlichen Nische entstanden sei: am Boden eines Ozeans, an dem sich Sand und andere Partikel – darunter auch Zellen von Meeresorganismen – als quarzreiche Sedimente ablagerten. Fedo war sich da keineswegs sicher. Von der Kartierung stark veränderter archaischer Formationen in Simbabwe, mit der er gerade ein Jahr zugebracht hatte, wusste er: Vulkanische Gesteine – die aus flüssigem Magma erstarrt sind – können, sofern sie eine Metamorphose durchgemacht haben, aussehen wie Sedimente und umgekehrt.

In der Folgezeit kehrten Fedo und der Geochronologe Martin J. Whitehouse vom Schwedischen Museum für Naturgeschichte in Stockholm noch einmal nach Akilia zurück, um ihre eigenen Kartierungen und chemischen Analysen vorzunehmen. Das Ergebnis veröffentlichten sie im Frühjahr 2002. Demnach seien die quarzreichen Gesteine, in denen Mojzsis und andere alte Sedimente sahen, in Wirklichkeit vulkanischen Ursprungs und verdankten ihr heutiges Erscheinungsbild einer speziellen Art von Metamorphose, die dafür bekannt ist, Graphit aus nichtbiologischen Kohlenstoffquellen zu erzeugen. Fedo und Whitehouse bestätigten zwar den Überschuss an leichtem Kohlenstoff, behaupteten jedoch, dass es eine nichtbiologische Erklärung dafür geben müsse. Sie nannten es voreilig, zu glauben, anorga-

IN KÜRZE

▶ Viele Spuren der ältesten, mikroskopisch kleinen **Lebewesen** auf der Erde – so genannte **Biosignaturen** – sind kaum noch erkennbar und mehrdeutig. Sie überzeugen am ehesten, wenn sich das sie umhüllende Gestein nachweislich unter **lebensfreundlichen Bedingungen** bildete, also etwa am Boden eines flachen Gewässers.

▶ Einige Biosignaturen können von **chemischen Reaktionen** vorgetäuscht werden, die unter sehr hohen Temperaturen und Drücken ablaufen. Solchen Bedingungen sind **Gesteine in der Tiefe** häufig ausgesetzt.

▶ Die genaue geologische **Interpretation einer Fundstätte** ist somit Grundbedingung einer jeden Suche nach Indizien für sehr **frühe Lebensformen** – auf der Erde wie auf dem Mars.



CHRISTOPHER M. FEDO, GEORGE WASHINGTON UNIVERSITY

Die weißen Streifen in diesem Aufschluss an der Südspitze der kleinen grönländischen Insel Akilia sind mit Fleckchen aus Kohlenstoff gesprenkelt, die zunächst als Beweis für Leben vor über 3,8 Milliarden Jahren galten.

nische Reaktionen könnten diese charakteristischen Isotopenverhältnisse nicht hervorbringen, nur weil das bisher nicht nachgewiesen worden sei.

Die Wurzel des Streits liegt in der unglaublich komplizierten Geologie von Akilia. Minik T. Rosing vom Geologischen Museum der Universität Kopenhagen geht deshalb so weit, die Insel als »völlig uninteressant« zu bezeichnen. Es sei nicht zu erwarten, dass sich die Erdwissenschaftler jemals über die Geschichte der Gesteine dort einigen würden. Und deshalb »dürften wir nie in der Lage sein«, so seine Einschätzung, »das Problem zu lösen«. Aus dem Mund eines gebürtigen Grönländers, der die Geologie seiner eisigen Heimat seit mehr als zwanzig Jahren erforscht, wiegen diese Worte schwer.

Nur Fingerzeige, aber kein Beweis

Doch viele Forscher sorgen dafür, dass die Debatte um Akilia nicht verstummt. So steht die Insel ganz oben auf der Agenda von Bruce Runnegar, dem neuen Direktor des Astrobiologischen Instituts der Nasa, das über ein Jahresbudget von immerhin knapp zwanzig Millionen Dollar verfügt. Es koordiniert die Aktivitäten von 15 Forschergruppen aus verschiedenen Teilen der USA, die sich darum bemühen, Fakten über den Ursprung und die Frühgeschichte des Lebens auf der Erde und anderswo zu sammeln. »Wir wollen Leute, die sich wirklich gut mit Gesteinen auskennen, innerhalb eines Jahres nach Akilia bringen und ein gewisses Einvernehmen darüber erzielen, was wir dort draußen finden und worüber wir eigentlich reden«, erklärt Runnegar.

Dessen ungeachtet weisen Rosing und andere Forscher – so der Paläontologe J. William Schopf von der Universität von Kalifornien in Los Angeles – auf ein fundamentales Problem hin: Selbst wenn sich Einigkeit darüber erzielen ließe, dass auf Akilia ehemalige Sedimente zu Tage liegen, bliebe offen, woher der Kohlenstoff stammt oder wann er in die Gesteine hineingeriet. Ihrer Ansicht nach ist Graphit mit einem Überschuss an leichtem Kohlenstoff in solchen hochmetamorphen Gesteinen allenfalls ein Fingerzeig auf mögliches Leben, nicht jedoch ein hieb- und stichfester Beweis.

Wenn Sedimente unter Druck erhitzt werden, besteht die Möglichkeit, dass heiße Flüssigkeiten oder Gase – Geologen sprechen von hydrothermalen Fluiden – Kohlenstoff aus anderen, jüngeren Quellen einschleppen. Außerdem kann sich unter solchen Bedingungen jedes organische Material zersetzen, auch wenn es von schützenden Apatitkristallen umhüllt ist. Dabei löst der Kohlenstoff bisherige chemische Bindungen und knüpft neue. »Meiner Meinung nach gibt es wirklich keinen brauchbaren Weg, um von den gemessenen auf die ursprünglichen Werte zurückzuschließen«, erklärt Schopf. »Es besteht ein großer Unterschied dazwischen, etwas zu wissen oder nur einen Hinweis darauf zu haben.«

Dabei hat das Rampenlicht, in dem Akilia steht, die Aufmerksamkeit von einem anderen Ort abgelenkt, an dem es auch Indizien für frühes Leben gibt: der nur 180 Kilometer nordöstlich gelegenen Isua-Formation im Südwesten Grönlands. Dort hatten Manfred Schidlowski und seine Kollegen vom Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz schon 1979 in Gesteinen, die sie für metamorph überprägte Sedimente hielten, eine Anreicherung von Kohlenstoff-12 um 2,5 Prozent gemessen. Die Interpretationsprobleme waren allerdings dieselben wie später in Akilia. Deshalb blieb die Bedeutung der Befunde umstritten.

Doch kürzlich spürte Rosing die Biosignatur des leichten Kohlenstoffs in Gesteinen auf, die seiner Ansicht nach im Vergleich zur mörderischen Tortur, die Akilias helle Schichten durchmachten, nur einen Nasenstüber erhalten haben. Sie zu finden, war nicht einfach gewesen. Isuas vier Kilometer breiter Gürtel aus archaischen Formationen ersteckt sich 35 Kilometer weit am Westrand von Grönlands gigantischer blaugrauer Eiskappe.

An den meisten Orten attestiert ein charakteristisches Schimmern in Verbindung mit einem Gefüge, in dem sich murmelgroße Kristalle aus rotem Granat, schwarzer Hornblende und blassgrünem Diopsid abwechseln, den Gesteinen eine ähnlich höllische metamorphe Vergangenheit wie denen von Akilia.

Unter Karibus und Schneehasen

»Ich bin da nicht hingegangen, um nach Leben zu suchen, und war in diesem Punkt immer sehr skeptisch«, sagt Rosing, der bei seinem ersten Besuch in Isua im Jahre 1980 nur erforschen wollte, wie hydrothermale Fluide die Gesteine verändert haben. Seither hat er des Öfteren in dieser verlassenen Gegend, die nur per Hubschrauber zu erreichen ist, ein bis drei Monate zugebracht – zwischen Karibus, weißen Schneehasen und Alpenschneehühnern. Dank dieser intensiven Erkundung konnte er schließlich all jene Gesteine aussortieren, die vulkanischen Ursprungs oder zu kompliziert aufgebaut waren, um eindeutige Spuren von Leben zu enthalten.

Dabei stieß er schließlich 1999 an Isuas Westrand auf einen viel versprechenden Aufschluss von Sedimenten, die auch nach Ansicht anderer Geologen vor mindestens 3,7 Milliarden Jahre entstanden und somit ähnlich alt wie die Gestei- ▷

▷ ne auf Akilia sind. In ihnen fand Rosing die Biosignatur des leichten Kohlenstoffs.

Dank der ziemlich ungestörten Geologie in diesem Teil Isuas gelang es, die Sedimentationsbedingungen, die sich in Akilia einfach nicht entschlüsseln ließen, im Detail zu rekonstruieren. Der leichte Kohlenstoff war eingebettet in ein dickes Paket aus Tonschichten, die sich über mindestens eine Million Jahre hinweg langsam abgelagert hatten. All die Zeit hindurch rieselte offenbar unaufhörlich Tag und Nacht zusammen mit den Tonpartikeln ein Regen aus organischem Material auf den Boden eines tiefen Ozeans hinab – mit exakt der Isotopen-Zusammensetzung wie bei heutigen Lebewesen. Inzwischen arbeitet Rosing daran, herauszufinden, welcher Typ von Mikroben damals am Meeresgrund begraben wurde. Bisher hat niemand seine Befunde und Schlussfolgerungen ernsthaft in Frage gestellt. »Sie sind nach einhelliger Meinung der beste Kandidat für frühe Lebenszeugnisse in Grönland«, erklärt Runnegar.

Doch selbst dieses stärkste Indiz von der eisigen Insel betrifft nur ein einziges Merkmal von Leben. Gleich mehrere Hinweise an einer einzigen Fundstätte wären wesentlich überzeugender. Und genau das war die Stärke von Schopfs Interpretation eines Ortes auf der anderen Seite der Erde – die für fast ein Jahrzehnt als unumstößliche Wahrheit galt.

Fossile Zellfäden?

Von allen denkbaren Biosignaturen hat die Versteinerung eines kompletten Organismus – selbst wenn sie nur eine oder zwei Zellen umfasst – die größte Beweiskraft. In dieser Kategorie bricht Australiens zeitlose Landschaft alle Rekorde. Unumstrittene Mikrofossilien – darunter solche von Photosynthese treibenden Cy-

Biosignaturen im Überblick

Vor den Pflanzen und Tieren besiedelten einzellige Mikroben die Erde. Wissenschaftler suchen in uralten Gesteinen nach Spuren ihrer einstigen Existenz – so genannten Biosignaturen. Doch die Indizien können trügerisch sein.

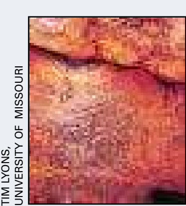


MINIK T. ROSING, UNIVERSITÄT KOPENHAGEN

Leichter Kohlenstoff

Definition: Kohlenstoff mit einem erhöhten Anteil des Isotops der Masse 12 gegenüber dem der Masse 13. Diese Biosignatur beruht darauf, dass Lebewesen beim Aufbau ihres organischen Materials aus Kohlendioxid den leichteren Kohlenstoff bevorzugen.

Ältester Fund: winzige Flecken von Graphit in mehr als 3,8 Milliarden Jahre alten Formationen auf der Insel Akilia vor Grönland. Jüngsten Untersuchungen zufolge waren die Gesteine jedoch nach ihrer Entstehung mehrfach hohen Temperaturen und Drücken ausgesetzt, unter denen sich das leichte Isotop auch auf nichtbiologischem Weg angereichert haben könnte. Damit ist Kohlenstoff (schwarze Punkte im Bild links) in Sedimenten aus Isua auf Grönland, die sich vor mehr als 3,7 Milliarden Jahren ablagerten, das älteste Relikt von Leben auf der Erde, an dem bisher niemand zweifelt.

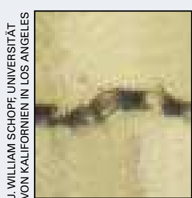


TIM LYONS, UNIVERSITY OF MISSOURI

Stromatolithen

Definition: Geschichtete, kuppelförmige Gebilde, die von Mikroben-Kolonien geschaffen wurden.

Ältester Fund: fossilisierte Höcker im Nordwesten Australiens, die vor mehr als 3,5 Milliarden Jahren entstanden sind. Es handelt sich um die frühesten Zeugen makroskopischen Lebens auf der Erde (links). Die meisten anderen Stromatolithen aus jener Zeit sind als Biosignaturen umstritten, weil sie wegen ihrer einfacheren Schichtstruktur auch mineralischen Ursprungs sein könnten.



J. WILLIAM SCHOPF, UNIVERSITÄT VON KALIFORNIEN IN LOS ANGELES

Mikrofossilien

Definition: versteinerte Überreste von mikroskopisch kleinen Zellen

Ältester Fund: kohlenstoffreiche »Perlschnüre« (links) in 3,5 Milliarden Jahren alten Gesteinen aus dem Nordwesten Australiens. Nach neueren Untersuchungen könnten sie jedoch auch das Produkt einfacher chemischer Reaktionen sein. Jüngere Mikrofossilien – darunter ein zwei Milliarden Jahre altes Cyanobakterium aus Nordkanada – sind dagegen weithin akzeptiert.

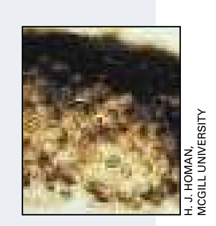


ROGER BUICK, UNIVERSITY OF WASHINGTON

Leichter Schwefel

Definition: Schwefel mit einem erhöhten Anteil des Isotops der Masse 32 gegenüber dem der Masse 34. Mikroorganismen, die Schwefelverbindungen als Energiequelle nutzen, können diese Anreicherung bewirken.

Ältester Fund: Flecken des schwefelhaltigen Minerals Pyrit in 3,5 Milliarden Jahre alten Gesteinen im Nordwesten Australiens. Einige Forscher bezweifeln allerdings, dass sich die stachelförmigen, grauen Kristalle (rechts) in einer Umgebung gebildet haben, in der Leben möglich war. Eindeutig wird die Interpretation dieser Biosignatur ab einem Alter von rund 2,5 Milliarden Jahren.

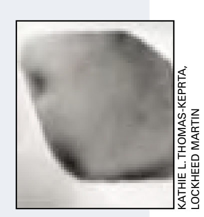


H. J. HOMAN, MCGILL UNIVERSITY

Molekulare Fossilien

Definition: komplexe organische Moleküle, die denen in heutigen Zellen ähneln.

Ältester Fund: Kohlenwasserstoffe in australischen Gesteinen, die vor 2,7 Milliarden Jahren entstanden sind. Sie gelten als Überbleibsel versteinerter Zellmembranen und damit als ältester unstrittiger Nachweis für eukaryotische Zellen (mit echtem Zellkern) und Sauerstoff produzierende Cyanobakterien, möglicherweise Vorläufer der 700 Millionen Jahre jüngeren *Eoentophysalis* (rechts).



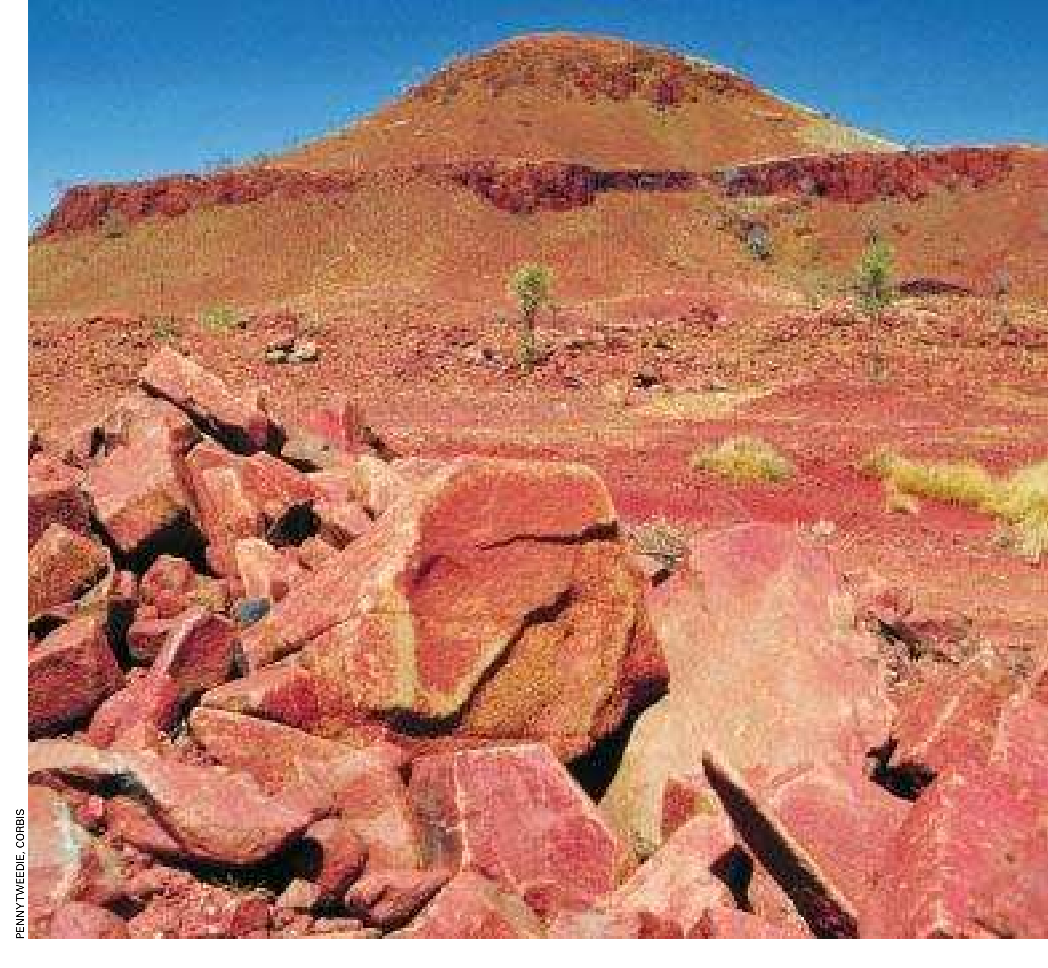
KATHIE L. THOMAS-KEPRTA, LOCKHEED MARTIN

Biominerale

Definition: mineralische Körnchen, die von lebenden Zellen produziert wurden.

Ältester Fund: einzigartig geformte Gebilde aus dem magnetischen Mineral Magnetit (rechts), die in dem 3,9 Milliarden Jahre alten Marsmeteoriten ALH84001 entdeckt wurden und fast identisch mit denen sind, die in heutigen irdischen Bakterien vorkommen. Ähnliche Magnetitkristalle fanden sich auch in zwei Milliarden Jahre alten australischen Gesteinen. In beiden Fällen wird der biologische Ursprung allerdings angezweifelt.

Die Marslandschaft der Region Pilbara in Westaustralien ist der Fundort von knapp 3,5 Milliarden Jahre alten mikroskopischen Einschlüssen, die manche Forscher als versteinerte Fäden aus urtümlichen Zellen deuten.



PENNY TWEEDIE, CORBIS

anobakterien – sind hier in zwei Milliarden Jahre alten Gesteinen zu finden. Auch überzeugende Beispiele so genannter molekularer Fossilien – Relikte fettartiger organischer Moleküle, die ehemals Bestandteile von Zellmembranen waren – wurden kürzlich in 2,7 Milliarden Jahre alten Formationen entdeckt. Doch keiner dieser spektakulären Funde spannte den Bogen des fossil dokumentierten Lebens so weit zurück in die Vergangenheit wie die Pionierarbeit Schopfs. Drei Jahrzehnte lang vertiefte er sich in das Studium uralter mikroskopischer Fossilien und weckte mit der Veröffentlichung seiner Resultate 1993 allgemeine Begeisterung.

Wie in Grönland verbergen sich auch Down-under die ältesten Fingerzeige auf Leben in einer abgelegenen, trostlosen Gegend: einem Landstrich im Nordwesten Australiens, rund 1200 Kilometer nördlich von Perth gelegen. Wären da nicht die Kängurus, die über das stachlige Spinifex-Gras hüpfen, oder die seltenen Rasthäuser an den Kreuzungen staubiger Pisten, man käme sich in dem öden, flachen Hügelland wie auf dem Mars vor. In der Nähe von Marble Bar, einem winzigen Wasserloch in diesem wogenden Meer aus roten Farben, haben Geologen schon vor langer Zeit den Apex Chert beschrieben. Diese Lagerstätte aus mikrokristallinem Quarz, die Schopfs berühmte Fossilien beherbergt, entstand einst aus einem Gemisch von Sand und kleinen Steinen, das die Wellen einer flachen Meeresstraße zwischen aktiven Vulkanen umspülten.

Der Quarz selbst lässt sich ebenso wenig datieren wie die graphithaltigen Gesteine in Grönland. Doch er liegt wie der Belag eines Sandwichs zwischen zwei Lavaströmen, deren Alter auf exakt 3,46 und 3,47 Milliarden Jahre bestimmt werden konnte. Damit ist er die älteste unter dem halben Dutzend Fundstätten mutmaßlicher archaischer Mikrofossilien, von denen vier in Südafrika liegen.

Eingebettet im Apex Chert sind gewundene, perlschnurartige Strukturen aus Graphit, in denen Schopf die fadenförmigen Stränge einst lebender Zellen sieht. Bei genaueren Analysen identifizierte der Paläontologe elf verschiedene Spezies bisher unbekannter Mikroorganismen, womit das Ödland im Nordwesten Australiens nicht nur die älteste, sondern auch die artenreichste Lagerstätte archaischer Fossilien wäre.

Für den biologischen Ursprung der Strukturen spricht außer dem Augenschein auch ihre Anreicherung mit leichtem Kohlenstoff. Hinzu kommt, dass es ganz in der Nähe fossile Stromatolithen gibt. Diese mineralisierten Höcker aus Bakterienmatten gelten als einzige Zeugen archaischen Lebens, die mit bloßem Auge zu sehen sind.

Tiefseeschlot statt Brandung

Wegen dieses Dreiklangs an Indizien wurden die Funde überall – von Lehrbüchern über das Fernsehen bis zum Guinness Buch der Rekorde – als Meilenstein auf der Suche nach den ältesten irdischen Lebensspuren gefeiert. Doch Anfang 2002 kam die kalte Dusche: Der Mikropaläontologe Martin Brasier von der Universität Oxford und sieben seiner Kollegen ließen kein gutes Haar an Schopfs hochgelobter Wiege des Lebens, nachdem sie die örtliche Geologie und die angeblichen Fossilien einer kritischen Prüfung unterzogen und dabei eine Reihe von Unstimmigkeiten entdeckt hatten (Spektrum der Wissenschaft 8/2002, S. 16). Unter anderem machte Brasier geltend, dass sich der Quarz nicht am Boden eines flachen Meeres abgelagert habe, sondern tief unter der Wasseroberfläche an heißen Quellen. Dieser Unterschied ist von entscheidender Bedeutung, weil Schopf behauptet hatte, viele seiner Fossilien seien auf Licht angewiesene Cyanobakterien gewesen.

Inzwischen gibt der massiv Attackierte zu, dass es ein Fehler war, die genaue geologische Einordnung der Fundstätte anderen zu überlassen. Widerstrebend räumt er zudem ein, dass seine berühmten Fossilien nicht unbedingt von Cyanobakterien stammen müssten. Statt in einer sonnigen, flachen See zu treiben, könnten die versteinerten Organismen auch die Vorgänger jener hitzeliebenden Bakterien gewesen sein, die heute die dampfenden Teiche im Yellowstone National Park bunt färben oder auf Tiefseevulkanen siedeln.

Noch schwerer wog Brasiers Behauptung, viele der mikroskopischen Strukturen, die Schopf als Fossilien ausgab, seien nichts als bloße Artefakte, zufällige mineralische Bildungen. Aber hier konnte sich der Paläontologe halbwegs aus der Affäre ziehen, indem er und sein Team mit den Ergebnissen einer Untersuchung ▷

▷ der einstigen Funde mittels Raman-Spektroskopie konterten; dabei liefert an der Probe gestreutes Laserlicht Informationen darüber, wo überall bestimmte chemische Bindungen auftreten – speziell solche zwischen den Kohlenstoffatomen im Graphit. Bei dieser Art von Durchleuchtung sahen viele Flecken tatsächlich ein wenig wie Zellwände aus.

Dennoch hält es Brasier für wahrscheinlicher, dass die Gebilde und auch ihre Anreicherung an leichtem Kohlenstoff das Produkt anorganischer chemischer Reaktionen sind – analog dazu, was Fedo für den Graphit auf Akilia behauptet. Obwohl sich diese Vermutung noch nicht wirklich belegen lässt, deuten eine Hand voll Experimente darauf hin, dass eine geeignete Kombination von Metallen und anderen chemischen Verbindungen, wie sie an heißen Tiefseequellen reichlich vorkommen, abiotische Reaktionen in Gang setzen können, welche Graphit erzeugen und dabei die Vorliebe des Lebens für das leichte Kohlenstoff-Isotop imitieren. Zwar hält auch Brasier nicht für ausgeschlossen, dass ein Teil des Kohlenstoffs von hitzeliebenden Mikroben stammt. Dennoch betont er: »Man muss den nichtbiologischen Ursprung dieser Materialien ausschließen, bevor man ihre biologische Herkunft behaupten darf.«

Dasselbe gilt seiner Ansicht nach für eine weitere Biosignatur: die Anreicherung von Schwefel der Masse 32 in 3,47 Milliarden Jahre alten australischen Gesteinen, die man nach einer zweistündigen, halsbrecherischen Jeepfahrt vom Apex Chert in Richtung Nordosten erreicht. Die schwefelreichen Gesteine an diesem glühend heißen Ort, der ironischerweise »North Pole« (»Nordpol«) heißt, enthalten einen Überschuss des leichten Isotops gegenüber dem der Masse 34. Diese Signatur ist charakteristisch für Bakterien, die Schwefelverbindungen als Energiequelle nutzen, und weist – genau wie die des leichten Kohlenstoffs – in der jüngeren Erdgeschichte eindeutig auf Leben hin.

Doch bei den uralten Formationen Westaustraliens stellt sich dieselbe Frage wie auf Grönland: Stammen die Gesteine von Sedimenten ab, die sich im mäßig warmen Lebensraum von Bakterien ablagerten, oder entstanden sie unter extrem heißen Bedingungen, bei denen nichtbiologische Reaktionen das bakterielle Isotopenmuster nachahmten? Der australische Geologe Roger Buick und seine Kollegen an der Universität von Washington in Seattle vermuten Ersteres. Ihrer Ansicht nach bildeten sich die schwefelhaltigen Kristalle in einer verdunstenden Lagune. Doch Forscher wie Runnegar sehen das völlig anders.

Jenseits der Erde

Ungeachtet aller Einwände hält Schopf an seiner Grundposition fest. Auch wenn auf eine bestimmte Biosignatur ein Schatten von Ungewissheit falle, sei sie damit nicht nutzlos. Die einzeln vielleicht anfechtbaren Indizien an ein und demselben Ort fügten sich in ihrer Gesamtheit dennoch zu einem überzeugenden Bild. Sein Credo lautet: »Wenn es aussieht wie Leben, sich ökologisch wie Leben verhält, die Isotope des Lebens produziert und auch sonst zum Erscheinungsbild von Leben passt, dann ist es höchstwahrscheinlich auch Leben.«

In der Tat hat sich als wichtigste Quintessenz aus diesen Debatten wohl eines herauskristallisiert: Gleich ob man in uralten irdischen Gesteinen oder kartoffelgroßen Meteoriten von anderen Planeten nach einem Beweis für Leben

Magnete vom Mars


SETI LEAGUE

Meteorit ALH84001

Die Nachricht über die Entdeckung von Lebensspuren in dem vom Mars stammenden Meteoriten ALH84001 war 1996 eine Sensation. Doch das Häuflein der vorgebrachten Indizien schmolz im Sperrfeuer der Kritik schnell dahin. Inzwischen wird nur noch eines ernsthaft diskutiert: winzige Körnchen des Minerals Magnetit. Die Kristallographin Kathie L. Thomas-Keprta von der Firma Lockheed Martin in Houston und ihre Mitarbeiter behaupten, die Kristalle seien nicht von den Mini-Magneten mancher irdischen Bakterien zu unterscheiden. Mit dieser Überzeugung haben sie inzwischen schon fast acht Jahre lang den Einwänden der Skeptiker getrotzt.

Dass sich der in der Antarktis gefundene Meteorit vor 3,9 Milliarden Jahren auf dem Mars gebildet hat, bestreitet kaum jemand. Nach Ansicht vieler Forscher könnte jedoch – ähnlich wie bei einigen vermeintlichen Biosignaturen in irdischem Gestein – auch ein abiotischer chemischer Prozess die lebensähnlichen Strukturen hervorgebracht haben. Denkbar wäre im Falle der Magnetitkristalle etwa die hitzebedingte Umformung eisenreicher Minerale während einer Kollision mit dem Mars. Doch bei solch einem Zusammenprall müsste, so die Entgegnung von Thomas-Keprta, der Magnetit mit Elementen wie Magnesium und Mangan verunreinigt sein. Ihre Mineralkörner seien aber völlig rein.

NASA UND HUBBLE HERITAGE TEAM

Mars

Außerdem weist rund ein Viertel von ihnen mindestens fünf auffällige Gemeinsamkeiten mit dem Magnetit des irdischen Bakterienstammes MV-1 auf. So haben sie ungefähr die gleiche Größe und sind frei von sichtbaren Strukturfehlern. Des Weiteren zeigen sie, wie die Forscherin und ihre Mitarbeiter erst kürzlich durch neue dreidimensionale tomographische Aufnahmen erhärten konnten, eine ungewöhnliche, längliche Kristallform, die ihre Eignung als Kompassnadeln verbessert und nach bisheriger Kenntnis ausschließlich auf biologischem Weg entsteht. Wenn ein Magnetit-Teilchen im Meteoriten nur eines der sechs Kriterien nicht erfüllt, scheidet es aus. Diese Anforderung ist so hoch, dass sogar ein Drittel der bakteriellen Kristalle durch das Raster fallen würde, betont Thomas-Keprta.

Angesichts dieser Befunde ist sich die Forscherin sehr sicher, dass die winzigen Magnete echte Zeichen vergangenen Lebens auf dem Mars sind. Viele Kollegen bleiben jedoch skeptisch. Immerhin empfindet es auch Thomas-Keprta als Mangel, dass sie nur ein einziges überzeugendes Indiz vorweisen kann. Deshalb haben sie und ihr Team mit der systematischen Suche nach einem speziellen Eisensulfid-Mineral begonnen, das magnetische Bakterien auf der Erde in Gegenwart von Schwefelwasserstoff erzeugen.

MITSUAKI IWAGO, MINDEN PICTURES

Stromatolithen sind turmartige Strukturen aus verkalkten Matten von Cyanobakterien und entstehen auch heute noch an Orten wie der Haifischbucht in Westaustralien. Urtümliche Versionen dieser Gebilde, die auf ein Alter von rund 3,5 Milliarden Jahren datiert wurden, gehören zu den wenigen mit bloßem Auge sichtbaren Lebensspuren aus jener Urzeit, die auch dem kritischen Blick der meisten Skeptiker bisher standhielten.

sucht, man sollte nie auf ein einzelnes Pferd setzen. Dies gilt auch für Missionen zum Mars. Brasier mahnt, sich vorab über die Kriterien zur Entdeckung frühen Lebens klar zu werden. Andernfalls befürchtet der Forscher nur »fruchtlose Debatten, die nichts weiter bewirken, als die wissenschaftliche Gemeinschaft zu entmutigen«.

Deshalb will die Nasa denn auch mit ihren jüngsten Missionen zum Roten Planeten vorrangig die Geologie des Mars ergründen, bevor sie sich auf die Suche nach vergangenem Leben macht. »Wenn man bedenkt, dass Erdwissenschaftler nun schon 200 Jahre lang über den Globus wandern und noch immer Probleme haben, sich auf verlässliche Biosignaturen zu einigen, sind wir meilenweit davon entfernt, zuverlässig Spuren einstiger primitiver Organismen auf dem Mars zu identifizieren«, sagt der Planetengeologe Stephen Squyres von der Cornell-Universität in Ithaca (US-Bundesstaat New York).

Seit 1995 hat er als Chefwissenschaftler an den jüngsten Mars-Landungsmissionen der Nasa mitgearbeitet. Bewusst beschränkt sich deren Aufgabe vorderhand darauf, die Oberfläche des Planeten nach Hinweisen auf lebensfreundliche Umgebungen in seiner Vergangenheit abzusuchen. Die beiden ferngesteuerten Roboterfahrzeuge Spirit und Opportunity sind an zwei Stellen gelandet, an denen frühere, den Mars umkreisende Sonden Hinweise auf einstiges flüssiges Wasser – Grundvoraussetzung aller bislang bekannten Lebensformen – gefunden haben.

Wie die Erfahrungen aus Grönland und Australien lehren, ist es auf der Erde deshalb so schwierig, beweiskräftige frühe Lebensspuren zu entdecken, weil die permanenten Bewegungen der tektonischen Platten während der letzten vier Milliarden Jahre die Erdkruste immer wieder durchgewalkt und alle fossilen Relikte dabei zunehmend zerstört haben. Auf dem Mars gab es höchstwahrscheinlich nie einen derartigen globalen Umgestaltungsprozess. Deshalb erwarten viele Forscher, dass sich seine Oberfläche in dieser Zeitspanne – abgesehen von einigen Meteoriteneinschlägen – unversehrt erhalten hat. Squyres ist sich der Ironie der Situation bewusst: »Wenn Leben auf dem Mars entstand, dann sollte es viel leichter zu finden sein als auf der Erde«, meint er. ◁

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE



Sarah Simpson ist feste freie Mitarbeiterin bei Scientific American.

Metasomatic origin of quartz-pyroxene rock, Akilia, Greenland, and implications for earth's earliest life. Von Christopher M. Fedo und Martin J. Whitehouse in: Science, Bd. 296, S. 1448; 7.3. 2002

Questioning the evidence for earth's oldest fossils. Von Martin D. Brasier et al. in: Nature, Bd. 416, S. 76; 7.3.2002

Cradle of life: the discovery of earth's earliest fossils. Von J. William Schopf. Princeton University Press, 2001

^{13}C-depleted carbon microparticles in >3700-Ma sea-floor sedimentary rocks from West Greenland. Von Minik T. Rosing in: Science, Bd. 283, S. 674; 29.1.1999

Evidence for life on earth before 3,800 million years ago. Von Stephen J. Mojzsis et al. in: Nature, Bd. 384, S. 55; 7.11.1996

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

BEVÖLKERUNGSPOLITIK

Heiratsverbote

Im vermeintlich idyllischen Biedermeier schränkten mehrere deutsche Staaten das Heiraten drastisch ein, weil sie die ungehemmte Vermehrung hungernder Volksmassen fürchteten. Das paradoxe Resultat: viele uneheliche Kinder und erhöhte Säuglingssterblichkeit.

Von Manfred Vasold

Einzelne Staaten haben in der Vergangenheit ihren Untertanen verboten, sich zu verheiraten oder ganz bestimmte Personen zu heiraten. Sie knüpften beispielsweise die Eheschließung an Voraussetzungen, und wo diese nicht erfüllt waren, versagten sie die Heiratserlaubnis. Noch im September 1935 hat die deutsche Regierung in den »Nürnberger Gesetzen« die Heirat zwischen deutschen Staatsbürgern jüdischen Glaubens und deutschen Nichtjuden verboten.

Im 19. Jahrhundert waren die Eheverbote von anderer Art: Mehrere deutsche Staaten verweigerten ihren Bewohnern die Heirat, wenn diese nicht glaubhaft machen konnten, dass sie wirtschaftlich auf eigenen Beinen stehen würden. Wer diesen Nachweis nicht zu erbringen vermochte, der wurde zur kirchlichen und weltlichen Eheschließung nicht zugelassen. Der Hintergrund dieser Heiratsverbote ist einfach genug: Die Regierungen fürchteten, die Armen könnten sich in der Ehe unbegrenzt vermehren, und aus der Sicht der Jahrzehnte vor 1850 war diese Furcht begründet.

Was die Geschichtswissenschaft wie auch die Kunstgeschichte liebevoll als »Biedermeier« bezeichnen, ein scheinbar idyllisches Zeitalter zwischen dem Ende der Napoleonischen Kriege (1815) und dem Vormärz – so nennt man die Epoche unmittelbar vor 1848 –, das war in Wirklichkeit eine bitterarme Zeit, ein Zeitalter des Hungers und der Massenarmut. Die Bevölkerung war ständig gewachsen, seit die Verluste des Dreißigjährigen Krieges (1618–1648) um die Mitte des 18. Jahrhunderts behoben waren, und nun saßen die Menschen in Europa dichter auf dem Boden als je zuvor, derweil die Erträge aus der Landwirtschaft noch immer so kärglich waren wie im Mittelalter. In dieser Zeit wurden viele öde Landstriche – Moore und dergleichen – trockengelegt, um sie unter den Pflug zu nehmen.

Wer den »Essay on the Principle of Population« (1798) des britischen Nationalökonomen Thomas Malthus gelesen hatte, wusste Bescheid oder glaubte es zumindest: Die Bevölkerung wuchs sehr viel schneller als die Nahrungsmittel. Ein Junge, der »von seinen Eltern seinen Lebensunterhalt nicht bekommen kann«, schrieb Malthus in seinem Buch, »und dessen Arbeitskraft die Gesellschaft nicht will«, solle einfach den Tatsachen ins Auge blicken. »Bei dem gewaltigen Festmahl der Natur ist für ihn kein Gedeck frei. Sie sagt ihm, er solle sich entfernen, und setzt ihren Befehl auch sehr schnell durch.«

Die Angst vor den Armen

In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts, vor der Industrialisierung, herrschte mit Blick auf die künftige Entwicklung größte Schwarzseherei. Man hatte Angst vor den nachwachsenden Hungrigen. Folglich wollte man das Bevölkerungswachstum drosseln. Die Lehren aus der Vergangenheit zu Grunde legend konnte man nur glauben, dass die Ernährungssituation sich noch verschlechtern würde. Der Nürnberger Arzt von Hoven, der darauf drängte, ein neues Krankenhaus in Nürnberg zu errichten, schrieb zur Begründung, »das bestehende [sei] immer zu klein, weil bey zunehmender Armuth (einer nothwendigen Folge der zunehmenden Bevölkerung) die Kranken mit jedem Jahre sich vermehren«. Diese pessimistische Prognose war überall zu vernehmen. Dass bei weiterem Bevölkerungswachstum die Menge an Nahrungsmitteln für jeden Einzelnen zurückgehen müsse, hielt man vor der Industrialisierung für un-

Im Gemälde »Auspfändung« (1847) von Leopold Bendix verliert eine Familie das Dach über dem Kopf und wird ins Elend gestürzt. Eine idyllischere Unterschriftsszene schildert ein anderer Biedermeier-Maler, Benjamin Vautier, im Ölbild »Auf dem Standesamt« (1888).

BEIDE BILDER: ARTOTHEK

widerleglich. Es gab eigentlich nur eine Möglichkeit, dem Massenhunger zu entgehen, nämlich kein weiteres Bevölkerungswachstum zuzulassen.

Wie sollte es weitergehen, wenn Arme ungehemmt Kinder in die Welt setzten und man schließlich die vielen hungrigen Mäuler nicht mehr stopfen konnte? 1831 verfasste der Ulmer Bürgermeister Wolbach eine Schrift an die Regierung und malte in den düstersten Farben die Folgen der Verehelichungsfreiheit aus. Er schilderte den Fall eines seit seinem elften Lebensjahr immer wieder straffällig gewordenen jungen Mannes, dem die Heiratserlaubnis erteilt werden musste und der wenige Wochen später der Armenkasse zur Last fiel.

Armut gab es zu allen Zeiten, schrieb der Schweizer Dichter Jeremias Gotthelf (1797–1854) und fuhr fort: »Aber noch nie waren die Armen so zahlreich im Verhältnis zu den Besitzenden wie jetzt, nie war ... ihre Haltung gegen die Besitzenden so drohend, ihre Stimmung so feindselig.« Die Angst vor den Armen war groß. Der Hallenser Arzt Carl August Weinhold meinte: »Neun Zehntel einer nahrungslosen Menschenmasse sind der größte Feind, den ein Staat haben kann.« Er verfasste Schriften mit Titeln wie »Von der Übervölkerung in Mittel-Europa und den Folgen auf die Staaten und ihre Civilisation« (Halle 1817) – oder »Ueber das menschliche Elend, welches durch den Missbrauch der Zeugung herbeigeführt wird« (Leipzig 1828). Die Bedrohung, dass die Hungrigen »uns auffressen« würden, hat noch Reichskanzler Bismarck (1815–1898) empfunden.

Im Vormärz, dem Zeitalter des Pauperismus, erschienen unzählige Schriften, die sich mit der Frage beschäftigten, wie man die Not der großen Massen lindern könne. Vor allem sozial gesinnte Ärzte verfassten derlei Traktate. »Ärztliche Vorschläge zur Milderung der gegenwärthigen Noth durch den Mangel und die Theuerung der Nahrungsmittel« lautet ein solcher Titel, erschienen 1846 in Erlangen, ▷

AKG BERLIN

»Warteschlange vor dem Obdachlosenasyl« betitelte Sir Luke Fildes 1874 sein warnendes Elendsbild, angeregt von den sozialkritischen Erfolgsromanen des englischen Schriftstellers Charles Dickens.

von dem bayerischen Amtsarzt Ferdinand Escherich.

Der aus dem Hessischen stammende Historiker und Volkskundler Wilhelm Heinrich Riehl (1823–1897), der einerseits die »Familienlosigkeit des vierten Standes« beklagte, andererseits aber auch die Zunahme der Bevölkerung – und somit der Not – fürchtete, schrieb:

»Ich sah auf einem der höchsten bewohnten Punkte der Rhön ein einsam gelegenes ganz stattliches steinernes Haus. Der Besitzer hat aber wenig oder gar kein Feldgut. Er speculirt im Sommer auf allerlei gelegentlichen Erwerb, und der Sommer muß den Winter ernähren. In dem harten März 1852 als ich jene traurige Einöde besuchte, hatte er keine Kartoffel mehr im Haus, kein Geld und keine Arbeit, wohl aber 9 lebendige Kinder. Er konnte nicht einmal mit Erfolg bestellen gehen, denn sein Haus ist so abgelegen, daß eine halbwegs einträgliche Bettelfahrt ihm täglich einen Fußmarsch von sechs bis acht Stunden im Schnee kosten würde. Man wird ihn unterstützt haben, und er wird nicht verhungert sein mit seinen neun Kindern. Aber es fragt sich, ist das nicht Barbarei aus Philanthropie, Grausamkeit aus weichem Herzen gewesen, welche einem Mann erlaubte, eine Familie zu gründen, wo er in einer den Ackerbau kaum zulassenden Gebirgslage bloß ein Haus besaß, dazu etwas Spekulationsgeist, aber keine Aussicht, weder Handwerk noch Landwirtschaft betreiben zu können? Den Proletariern das Heiraten zu verbieten, ist oft wenig ‚human', aber desto menschlicher. Wenn einer auf der hohen Rhön bloß ein Haus besitzt und auf diesen Besitzstand hin eine Familie gründen will, so ist das gerade, wie wenn ein Städter nachwiese, daß er Eigentümer eines Ehebettes und einer Kinderwiege sei, und auf Grund dieses Besitzstandes um Heiratserlaubnis einkäme.«

In einigen deutschen Staaten gab es ältere Ehebeschränkungen aus der Zeit des Absolutismus; sie fielen kurz nach 1800. Aber schon die schwere Hungersnot von 1816/17, Folge einer äußerst schlechten Ernte, die dem »Jahr ohne Sommer« folgte, rief erneut Politiker auf den Plan, die solche Verbote forderten. Mehrere Staaten im Norden wie im Süden Deutschlands erließen in den 1830er Jahren Eheverbote gegen Personen, deren künftige Existenz sie nicht als gesichert betrachteten. Im Königreich Bayern erging dieses Gesetz am 1. August 1834. Hessen-Darmstadt folgte ziemlich spät mit einem Verbot der Verehelichungsfreiheit anno 1851. Im Verlauf der Hungersnot von 1854 erreichte die Zahl der Empfänger öffentlicher Unterstützungen ihren Höhepunkt.

Wie groß war der Anteil der verbotenen Ehen? Im Königreich Württemberg wurden etwa sechs bis sieben Prozent der beantragten Ehen nicht gestattet, in Bayern, das aber die schärfsten Eheverbotsgesetze hatte, rund fünf Prozent. Als die andern Staaten die Verbote – mit Gründung des Norddeutschen Bundes, der 1868 die allgemeine Verehelichungsfreiheit verfügte – aufhoben, bestätigte Bayern 1869 sein Verbot von »Ehen von moralisch und wirtschaftlich schwachen Personen«. Die letzten Beschränkungen fielen in Bayern erst im Verlauf des Ersten Weltkrieges.

»Erfolg« zu einem hohen Preis

Hat Bayern erreicht, was es wollte, ein geringeres Bevölkerungswachstum? Ja, durchaus: Die bayerische Geburtenziffer war nach 1840 deutlich niedriger als die in Deutschland insgesamt. Im Königreich Bayern wuchs die Bevölkerung zwischen 1834 und 1871 nur um 14,5 Prozent, auf dem Boden des späteren Deutschen Reiches jedoch um 33,9 Prozent.

Dafür war freilich ein hoher Preis zu bezahlen, und zwar in der Münze enormer Säuglingssterblichkeit. Die Zahl der unehelich geborenen Kinder stieg in Süddeutschland dramatisch an. In den Jahren nach 1850 erreichte der Anteil der Unehelichen in den rechtsrheinischen Teilen Bayerns 24,6 Prozent; in den großen bayerischen Städten wie München und Nürnberg wurde fast die Hälfte aller Kinder außerhalb einer Familie geboren. Und die Sterblichkeit dieser unehelich Geborenen war sehr viel höher als die der ehelichen Neugeborenen.

Das erklärt zu einem beträchtlichen Teil das geringere Bevölkerungswachstum: Eines von drei Neugeborenen vollendete im Durchschnitt nicht sein erstes Lebensjahr, und unter den unehelich geborenen Kindern war die Sterblichkeit noch höher. Die Staaten mit den schärfsten Ehebeschränkungen hatten die höchste Säuglingssterblichkeit – eine schreckliche Entwicklung. Eine Lösung des Ernährungsproblems brachte erst die Industrialisierung, auch wenn sie den Zeitgenossen zunächst wie eine neue Bedrohung erschien.

AUTOR UND LITERATURHINWEIS

Manfred Vasold ist freiberuflicher Historiker mit dem Schwerpunkt Sozial- und Medizingeschichte.

Pauperismus und Bevölkerung. Die gesetzlichen Ehebeschränkungen in den süddeutschen Staaten während des 19. Jahrhunderts. Von Klaus-Jürgen Matz. Klett-Cotta, Stuttgart 1980

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Geknipste Augen-OP

Verschiedene Gründe sind es, die eine gute Augenphotographie so schwierig machen: Der im Bereich der Lidspalte sichtbare Teil des Auges ist gewölbt und seine glänzende Oberfläche gibt von jeder Lichtquelle einen Reflex, der … sehr störend sein kann. Da bei den meisten Aufnahmen eine Tiefenschärfe von 4 bis 5 mm mindestens erforderlich ist, muß genügend abgeblendet werden können. Die Belichtungszeit kann aber wegen der Lichtempfindlichkeit des Auges … eine bestimmte Dauer nicht überschreiten … Schließlich ist es erforderlich, daß mühelos eine ständige Kontrolle der Scharfeinstellung möglich ist und daß der Photograph den Operateur und den Patienten durch seine Arbeit nicht stört. *(Die Umschau, 54. Jg., Heft 7, 1. April 1954, S. 207)*

▼ Bloß nicht verwackeln, sonst misslingt das Augenphoto.





Die Peilscheibe der Nordkrieger

Auf Grönland wurde, wie »Stockholms Tidningen« berichten, ein von Experten einwandfrei als Navigationsinstrument der Wikinger erkanntes Gerät gefunden. Es besteht aus einer runden Holzscheibe, auf die 32 Radien eingeritzt sind – der heutige Kompaß zeigt deren 64 –, und im Zentrum sitzt ein kleiner Stab. Durch das Halten dieses primitiven Instrumentes in der Sonne und durch das Beobachten der Ritzen waren die alten Wikinger also imstande, ihre Fahrtrichtung zu erkennen. Bisher glaubte man, daß es reiner Zufall gewesen sei, daß die Wikinger Jahr für Jahr an den gleichen Stellen auf der andern Seite des Ozeans landeten; jetzt weiß man, daß es doch nicht (nur) dem Zufall, sondern ihrer eigenen Geschicklichkeit zu danken war. *(Das Antiquariat, 10. Jg., Nr. 7/8, 10. April 1954, S. 102/18)*

Hilfe für Blinde

Wie ein kleines Handköfferchen sieht ein Gerät aus, das dem Blinden in Zukunft vielleicht den Stock ersetzen wird … Von dem Gerät ausgesendete Lichtstrahlen werden vom Boden oder von Hindernissen auf dem Wege zurückgeworfen und in mechanische Schwingungen umgewandelt, die der Blinde im Handgriff des Apparats fühlt. Versuche an der Haverford Universität … haben erwiesen, daß der Apparat, obwohl er vorläufig noch recht unvollkommen ist, zu einer großen Hilfe für die ihrer Sehkraft beraubten Menschen werden kann. *(Orion, 9. Jg., Nr. 7/8, April 1954, S. IV/10)*

Knochenreste und Röntgenstrahlung

Otto Walkhoff hat die Skelettreste des berühmten Neandertalmenschen mit X-Strahlen durchleuchtet und ist auf Grund dieser Prozedur mit dem »Beingerüst des alten Sünders« zu den folgenden erstaunlichen Ergebnissen gelangt. Man hat den Neandertalmenschen vielfach als ein pathologisches Individuum betrachtet. Walkhoff konnte jedoch die vollständig normale Beschaffenheit der Knochen mit Sicherheit feststellen. Nur an der einen Ulna (Elle des Unterarmes) verrieten die X-Strahlen eine Bruchfläche; unser ehrwürdiger Vorfahre hatte also einen Armbruch erlitten, der aber regelrecht verheilt war … Ferner erkennt man … dass der Neandertalmensch durch aufrechten Gang den Unterkörper in derselben Weise belastet hat, wie der jetzige Mensch. *(Der Stein der Weisen, Bd. 31, 1904, S. 180)*

Eine botanische Entdeckung

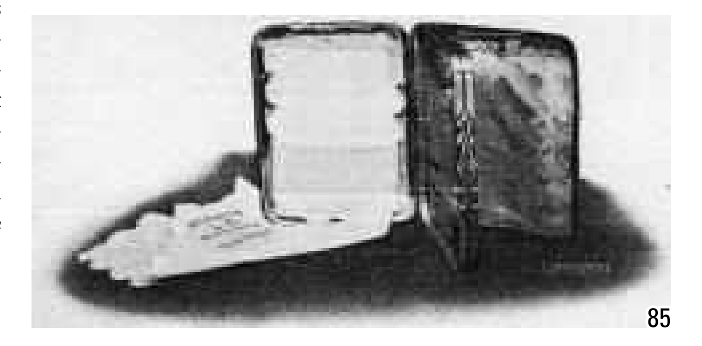
Der Pariser Akademie der Wissenschaften wurde in ihrer letzten Sitzung von einem Professor der Universität von Caen, Noël Bernard, eine interessante Mitteilung über die Orchideenkultur gemacht. Danach wird die Fortpflanzung der Orchideen durch die Vermischung eines faserartigen Pilzes mit dem Samen stark gefördert. Professor Bernard hat namentlich Versuche mit dem cypripedium (Frauenschuh) gemacht … Der Akademie … wurden als Beweis vorgewiesen: Samen von cypripedium allein, der nicht aufging, und gleicher Samen mit dem faserartigen Pilz vermischt …, wo man schon kleine Ansätze zu Orchideen sehen konnte. *(Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 76, 2. April 1904, S. 7)*

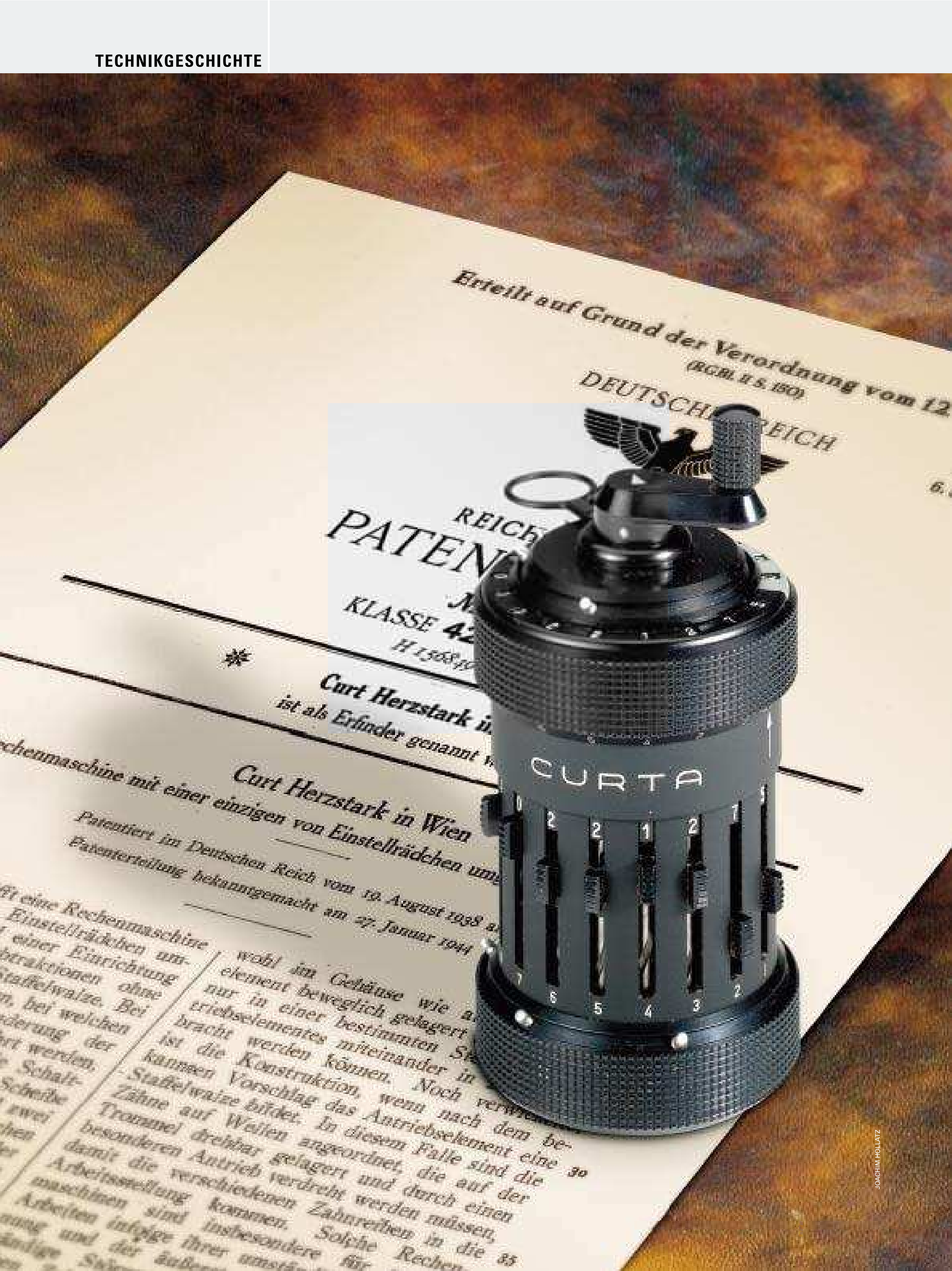
Neue Taschentücher



Es ist leichter, Krankheiten zu verhüten als sie zu heilen, doch bedarf es dazu einer regen Anteilnahme des gesamten Publikums und einer gewissen hygienischen Volkserziehung … Der bekannte Leiter des Pasteur-Instituts in Lille, Professor Calmette, hat … eine Neuerung eingeführt, die insbesondere für kranke Familien … empfohlen werden sollte. Er hat ein elegantes Metalletui etwa von der Grösse eines Zigarrettenetuis herstellen lassen … Dasselbe besitzt in der Mitte eine Scheidewand; auf die linke Seite kommen Taschentücher aus japanischem Seidenpapier oder einem billigen Baumwollstoff. Dieselben sind billiger als das Waschen kostet, man verbrennt sie … Die benutzten Taschentücher bringt man auf der rechten Seite des Etuis unter, wo sie vor der Berührung mit den sauberen durch die metallene Scheidewand gewahrt werden. *(Die Umschau, 8. Jg., Nr. 15, 9. April 1904, S. 296)*

▼ Als es Tempo noch nicht gab: aseptische Schnupftücher im Etui





JOACHIM HOLLATZ

Rechnen mit der Kurbel

Lange vor den ersten elektronischen Taschenrechnern gab es die Curta-Rechenmaschine – klein, genial und mechanisch. Und im Konzentrationslager rettete sie ihrem Erfinder das Leben.

Von Clifford Stoll

Was hätten Isaac Newton, Johannes Kepler oder Carl Friedrich Gauß für eine einfache Rechenmaschine gegeben! Immer wieder hatten sie sich über die Mühsal des Rechnens beklagt, die Unmengen Papier verbrauchte und einen Großteil ihrer Zeit raubte. Ein Taschenrechner – das wäre es gewesen! Am besten mit digitaler Ein- und Ausgabe und fingerfreundlicher Benutzeroberfläche …

Doch darauf musste die Welt bis 1947 warten. In diesem Jahr wurden in Liechtenstein die ersten Exemplare der raffiniertesten Rechenmaschine gebaut, der »Curta«. In den 1950er und 1960er Jahren priesen Werbeanzeigen die kleine Maschine als wahres Wunderwerk: »Klein genug für Ihre Hand und groß genug für jede Rechenaufgabe«, »die Curta ist nicht ortsgebunden und besitzt daher den entscheidenden Vorzug der unbeschränkten Einsatzmöglichkeit«, »kein Leerlauf bei schlechtem Wetter«. Gewicht: 230 Gramm, Preis: 485 DM.

In seiner Leistung kann das Gerät, das aussieht wie eine Pfeffermühle und bis heute eine eingeschworene Liebhabergemeinde begeistert, kaum mit einem modernen Taschenrechner für zehn Euro konkurrieren. Dafür brauchte die Curta keine Batterien. Sie war vollkommen mechanisch und hatte weder Tasten noch LCD-Anzeige. Zum Rechnen drehte man eine Kurbel.

Eine Rechenmaschine zum Aufziehen also? Mitnichten! Nachdem ich mit der linken Hand über kleine Einstellgriffe Zahlen eingegeben habe, drehe ich mit der rechten die Kurbel und sehe, wie in den winzigen Fenstern auf der Oberseite der Maschine das Ergebnis erscheint.

Rechnen mit kleinen Maschinen

Ich kann sogar multiplizieren und dividieren, muss dafür allerdings bei größeren Zahlen zehn- bis zwanzigmal kurbeln. Es gibt keinen Ein/Aus-Schalter; der Speicher wird mit Hilfe eines handlichen Ringhebels gelöscht. Selbst die Berechnung von Quadrat- und Kubikwurzeln ist möglich – wozu allerdings Tabellenwerke mitzuführen und ein paar algorithmische Tricks zu beherrschen sind. Immerhin klicken im Zählwerk der Curta elf Zählrädchen. Hat Ihr elektronischer Taschenrechner auch elf Stellen?

Also gut, die Curta kann rechnen, aber wie wurde sie zum »Schatz unserer Zivilisation«, zum »Wunder der Technik«? Warum hegen und pflegen Sammler diese Maschinchen, obwohl jeder Billigrechner schneller ist?

Ganz einfach: weil die eindrucksvollen rechnerischen Fähigkeiten der Curta einhergehen mit feinmechanischer Eleganz und solider Zuverlässigkeit. Die sanft gerasterten Einstellgriffe machen die blinde Zahleneingabe mit den Fingern zum Kinderspiel, während das sirrende Gleiten der Kurbel an eine feine Taschenuhr erinnert. Die Curta schnurrt bei der Arbeit.

Um Verwechslungen zu vermeiden, werden die eingegebenen Ziffern, die Anzahl der Kurbelumdrehungen und das Ergebnis in verschiedenen Zählwerken angezeigt. Falsche Eingaben lassen sich leicht rückgängig machen, während eine Sperrklinke die Beschädigung des Innenlebens durch versehentliches Rückwärtsdrehen verhindert. Auch der Löschhebel ist gegen unabsichtliche Betätigung gesichert.

Die Curta vereint die Präzision einer Schweizer Uhr und die solide Handwerksarbeit einer alten Nikon-F-Kamera mit der Eleganz eines Tangos. Und das alles in Gestalt eines gedrungenen, kaum neun Zentimeter hohen Zylinders. Eine tragbare Rechenmaschine: In den 1950er Jahren war das eine Sensation! Und dieses technische Wunderwerk entstand an einem Ort, an dem jede Zivilisation zunichte wurde, im Konzentrationslager Buchenwald.

So wie es heute um den immer leichteren Laptop geht, sehnten sich früher die Ingenieure und Buchhalter nach der kleinsten Rechenmaschine. Das »Arithmometer«, eine Addiermaschine, die Thomas de Colmar (1785–1870) für die Pariser Weltausstellung 1855 fertigte, hatte noch die Ausmaße eines Klaviers. Der fünfzig Jahre jüngere »Millionaire Calculator«, der nicht nur addieren und subtrahieren, sondern auch multiplizieren und dividieren konnte, wog immer noch rund 30 Kilogramm – nicht wirklich ein Taschenrechner. Dafür musste die Welt auf Curt Herzstark warten. ▷

◀ **Pfeffermühle, Kameraobjektiv, Bleistiftspitzer oder Rolle einer Angelschnur? Nichts von alledem. Die kleine Curta-Rechenmaschine ist mechanisch und präziser als manch moderner Taschenrechner heute.**

Herzstark, am 26. Januar 1902 in Wien geboren, wuchs mit Rechenmaschinen auf. Sein Vater handelte zunächst mit Geräten der Marken Remington und Burroughs und baute schließlich innerhalb von ein paar Jahren eine eigene Fabrik auf. Das Geschäft blühte, und der junge Curt reiste bald als Vertreter durch Österreich.

Am Ende des Ersten Weltkriegs stand Herzstarks Familienbetrieb, der Zulieferer der Rüstungsindustrie gewesen war, vor dem Ruin: Die Einrichtungen waren veraltet oder zerstört. Curts Vater musste sich mit dem Verkauf gebrauchter Rechenmaschinen über Wasser halten, bis die Fabrik wieder aufgebaut war. Zugleich trat die Konkurrenz auf den Plan – etwa in Gestalt von Fritz Walther, der sich mit automatischen Pistolen einen Namen gemacht hatte, aber angesichts der Rüstungsbeschränkungen nach dem Krieg seine Waffenfabrik umstellen musste und fortan elektrische Rechenmaschinen produzierte.

Mit Erfolg, denn in den 1930er Jahren boomte der Markt für Büromaschinen. »Aber etwas fehlte am Weltmarkt«, erinnert sich der 85-jährige Curt Herzstark in einem Interview aus dem Jahr 1987. »Wo immer ich auch hinkam, wurden mir wunderschöne, teure und große Maschinen vorgestellt. Doch der Polier, der Architekt und der Zollbeamte, mit denen ich sprach, beklagten einhellig, sie könnten nicht zehn Kilometer ins Büro fahren, bloß um ein paar Zahlen zusammenzuzählen.«

Einschlägige Hersteller wie Monroe, Friden und Marchant versuchten, ihre großen Tischmodelle auf die gleiche Art und Weise zu verkleinern wie der Uhrmacher die Wand- zur Armbanduhr – und scheiterten kläglich. Die »Lightweight« von Marchant wog gut 15 Kilogramm, verfügte über eine Tastatur mit neun Eingabespalten und einen Wagen mit 18-stelliger mechanischer Ausgabe. Aus ihrem Gehäuse ragten zwei Kurbeln von der Art, mit denen man früher Automotoren in Gang setzte. Man musste sie in einem großen Koffer umherschleppen: Das bedeutete »tragbar« im Jahr 1935!

Angesichts solcher Fehlschläge beschloss Curt Herzstark in den 1930er Jahren, ganz von vorne zu beginnen. »Ich stellte mir vor, ich hätte die Maschine schon erfunden. Wie muss sie also ausschauen, damit man sie benutzen kann? Kein rechteckiger Kasten, kein Brett! Sie muss ein Zylinder sein, sodass man sie in einer Hand halten kann, während man mit der anderen die Eingaben und Rechnungen durchführt. Das Ergebnis könnte dann auf der Oberseite angezeigt werden.«

Dann ein Gedankenblitz

Herzstark begann also – wie ein Programmierer – mit der »Benutzeroberfläche«. Das Design sollte nicht von der Mechanik bestimmt werden. Anstelle einer Tastatur entschied sich Herzstark für Einstellgriffe, die rund um den Zylinder angeordnet und leicht mit dem Daumen zu verschieben sein sollten. Auf diese Weise ergab sich ganz selbstverständlich, dass Ergebnisanzeige und Kurbel auf der Oberseite Platz fanden.

Bei den meisten mechanischen Rechenmaschinen gab es für jede Rechenstelle eine eigene Mechanik. Die Maschine von Friden etwa hatte für jede der zehn Tastenspalten ein separates Rechengetriebe, was sich in Preis und Gewicht niederschlug. Herzstark hingegen erkannte, dass ein einziges Getriebe alle Stellen nacheinander bedienen könnte. Auch wenn sein Rechner über acht Einstellschieber für die Zahleneingabe verfügte, würden die Zähne einer einzigen zentralen Walze die Berechnungen durchführen. Die Trommelform würde



BEIDE FOTOS MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON RICK FURR

die kleine und leichte Bauweise ermöglichen.

Im Jahr 1937 hatte Herzstark das Prinzip des Rechnens mit einer einzigen rotierenden Staffelwalze so weit entwickelt, dass er damit addieren und multiplizieren konnte. Nur Subtraktionen und Divisionen ließen sich noch nicht bewerkstelligen. Man konnte nämlich Zahlen nicht voneinander abziehen, indem man einfach die Kurbel rückwärts drehte. Dem Übertrag bei der Addition entspricht bei der Subtraktion das Borgen einer Eins aus der nächsthöheren Stelle; beides lässt sich nur von rechts nach links, nicht aber in der umgekehrten Reihenfolge durchführen.

»Ich saß im Zug durch den Schwarzwald, hatte ein Abteil für mich allein und schaute aus dem Fenster, als mir ein Gedanke durch den Kopf schoss. ›Donnerwetter! Man erhält das Ergebnis einer Subtraktion doch schlicht durch die Addition des Komplements.‹«

Man findet dieses Komplement einer Zahl, indem man jede ihrer Ziffern durch ihre Differenz zu 9 ersetzt. Eine Zahl zum Komplement einer anderen Zahl zu addieren läuft im Endeffekt auf eine Subtraktion hinaus. Als Beispiel wollen wir 788 139 minus 4890 berechnen. Das Komplement von 004 890 ist 995 109; das zu 788 139 addiert, ergibt 1 783 248. Die Eins an der höchsten Stelle – den Überlauf – lassen wir weg und erhalten 783 248. Schließlich addie-

IN KÜRZE

- **Der erste Taschenrechner** war mechanisch und erlaubte neben den vier Grundrechenarten auch das Ziehen von Quadratwurzeln. Anders als die (älteren) Rechenschieber rechnete er auf elf Stellen genau.
- **Der Erfinder Curt Herzstark** brachte seine Idee im Konzentrationslager Buchenwald zu Papier. Für eine kleine und leichte Bauweise bediente er sich neuartiger mathematischer und mechanischer Techniken.
- **In den 1950er und 1960er Jahren** war die Curta bei Wissenschaftlern, Ingenieuren, Landvermessern und Buchhaltern weit verbreitet. Sie verlor erst mit dem Einzug elektronischer Taschenrechner in den 1970er Jahren an Bedeutung.



◀ **Als der gerade erst achtjährige Curt Herzstark anlässlich einer internationalen Ausstellung für Büromaschinen in Wien im Jahr 1910 große Zahlen multiplizierte, galt er als Wunderkind (links). In Erinnerung an diese Zeit ließ sich Herzstark 1985 im Alter von 83 Jahren noch einmal vor einer solchen Maschine ablichten.**

ren wir 1 und kommen zu dem endgültigen Ergebnis 783 249. Statt 788 139 – 004 890 haben wir zunächst 788 139 + (999 999 – 004 890) berechnet; das war 1 000 000 zu viel – deswegen haben wir die führende Eins weggelassen – und 1 zu wenig, deswegen haben wir am Ende noch 1 addiert. Genauso machen es unsere heutigen Computer auch.

Herzstark beließ es bei einer einzigen Staffelwalze, versah diese aber mit zwei Zahnreihen, eine für die Addition und eine für die Subtraktion. Damit die zweite Zahnreihe in die Staffelwalze eingriff, war lediglich die Kurbel der Curta – und damit die Staffelwalze – um drei Millimeter anzuheben. So wurde Subtrahieren genauso einfach wie Addieren.

Multiplizieren und dividieren konnte man durch wiederholtes Addieren beziehungsweise Subtrahieren. Und da das Ergebnisregister relativ zu den Stellen der Eingabe verdreht werden konnte, ließ sich das vielfache Kurbeln auf ein Minimum beschränken. Um eine Zahl mit 31 415 zu multiplizieren, musste man also nicht 31 415-mal die Kurbel drehen, sondern nur 14-mal: 5-mal für die 5, einmal für die 10, 4-mal für die 400 und so weiter.

Im Jahr 1937 hatte Herzstark seine Universal-Rechenmaschine für die vier Grundrechenarten im Entwurf vollendet. Doch dann kam Hitler.

Im März 1938 marschierten die Deutschen in Österreich ein, und als Sohn einer katholischen Mutter und eines jüdischen Vaters war Curt Herzstark in Gefahr. »Die ersten Wochen waren schrecklich für uns. Der Mob, Judenhasser und viele schreckliche Dinge«, erzählte er in dem Interview von 1987.

Deutsche Offiziere suchten ihn auf, doch statt ihn zu verhaften, verlangten sie die Lieferung von Präzisionsteilen für die Kriegsindustrie. Und so produzierte die Fabrik für Rechenmaschinen nach ziemlich einseitigen Verhandlungen fortan Dinge wie Distanzlehren und Panzer-Kaliber.

Die Curta rettet ihm sein Leben

Einige Jahre ging alles gut. »Aber im Jahre '43 sind bei uns zwei Leute verhaftet worden. Sie hatten englische Radiosendungen gehört und Abschriften gefertigt. Die Schrift der Schreibmaschine führte zu einem unserer Mechaniker. Er wurde geköpft. Ein anderer wurde zu lebenslanger Haft verurteilt – was noch viel schlimmer war. Ich versuchte, bei der Gestapo zu intervenieren, doch der Offizier schmiss mich raus und rief: ›Was für eine Frechheit, dass sich ein Halbjude auch noch traut, für solche Leute zu sprechen!‹

Acht Tage später wurde ich als Zeuge geladen – und verhaftet. Mein Haus wurde durchsucht, und das alles natürlich ohne Verfahren. Ich wurde wegen der Unterstützung von Juden, Staatszersetzung und des Verhältnisses mit einer arischen Frau beschuldigt. Alles war konstruiert. Später erfuhr ich, dass ein Dutzend andere unter ganz ähnlichen Umständen verhaftet worden waren.«

Die SS warf Herzstark ins berüchtigte Prager Gefängnis Pankratz, wo Folterungen auf der Tagesordnung standen. »Ich teilte eine Zelle mit fünfzig anderen und ohne alles – keine Betten, und das Klosett war eine Art Waschbecken. Ich konnte von Glück reden, als ich nach Buchenwald geschickt wurde.

Dort wurde ich einer Arbeitseinheit zugeteilt. Es war November, und ich hatte nur ein Hemd, eine Sträflingshose, Holzpantoffeln und ein Mützchen. Ich arbeitete in der Gärtnerei und war vollkommen erschöpft.

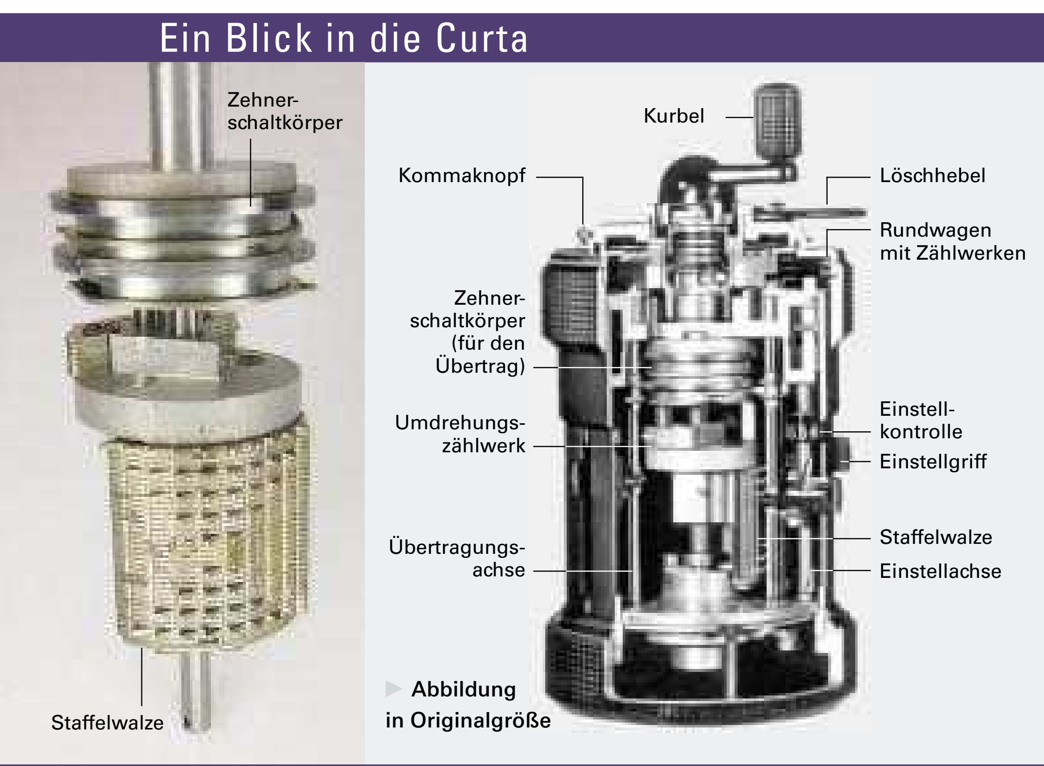
Ich war seelisch auf dem Nullpunkt und dachte ›hier muss ich sterben‹, als ich in die Kommandantur gerufen wurde. Dort saß ein SS-Offizier mit meinem Lebenslauf in der Hand und sagte: ›Sie haben der Wehrmacht dies und das geliefert. Hören Sie, wenn Sie unsere Befehle gehorsam ausführen, dann wird das Leben im Lager für Sie erträglich. Ich kommandiere Sie in unser Gustloff-Werk. Das ist eine feinmechanische Fabrik, die hier an das Lager angeschlossen ist. Wenn Sie sich dort bewähren, werden sie leben.‹«

In dem Werk hatte Herzstark dann die Aufsicht über die Produktion von Präzisionsteilen für die Heeresversuchsanstalt in Peenemünde. Zwei Jahre lang baute er Teile für die V2-Raketen. Als Verantwortlicher für den Bereich mechanischer Bauteile war er überall in der Fabrik tätig, und viele der Zwangsarbeiter dachten zunächst, er sei ein Informant.

»Sie merkten bald, dass ich kein Spion war. So stand ich einmal bei einem Maschinisten und sagte: ›Du bist sehr fleißig, aber du kannst ja nichts dafür, wenn du so etwas Einfaches auf einer so teuren Fräsmaschine machst.‹ Ich berichtete also, die Maschine sei schlecht ausgelastet. Der Häftling arbeitete musterhaft, die Organisation aber schlecht. So lernte ich viele Leute aus Luxemburg, Frankreich, Dänemark und anderen Ländern kennen.

Dann kamen natürlich Kameraden und sagten: ›Curt, du hast doch Einfluss. Kannst du nicht diesen oder jenen Kameraden in die Fabrik bringen? Der krepiert sonst.‹« Also richtete Herzstark einen Inspekteursposten ein, indem er einen Tisch aufstellte, einen inhaftierten Rechtsan- ▷

Ein Blick in die Curta



Die Curta ist 85 Millimeter hoch und hat einen Durchmesser von 53 Millimetern. Ein Blick in ihr Inneres zeigt, was schon in der alten Gebrauchsanweisung stand: »Die Curta-Rechenmaschine ist ein feinmechanisches Präzisionswerk.« Die Staffelwalze (links), mit der die wesentlichen Operationen durchgeführt werden, besteht aus 37 jeweils 0,5 Millimeter dicken Scheiben. Für den Übertrag gibt es eine weitere Einheit, den Zehnerschaltkörper. Die Ziffern in den Anzeigen sind drei Millimeter groß und selbst bei ausgestrecktem Arm gut lesbar. Das abgebildete Modell verfügte über elf Stellen. Später gab es auch eines mit 15 Stellen. Bis November 1970 wurden 150 000 Maschinen gebaut – viel weniger als der einst geschätzte Weltmarktbedarf von bis zu vier Millionen.

RICK FURR

▷ walt daran setzte und ihm ein Mikrometer in die Hand drückte. Dieser kleinen List verdankten der Jurist – und viele andere – ihr Überleben. Jahre später verlieh ihm Luxemburg für die Rettung einiger seiner Bürger die Ehrenbürgerschaft.

»Die SS-Männer hatten die Oberaufsicht über uns. Jedesmal, wenn eine Inspektion nahte, erhob sich ein Hustkonzert, sodass der Anwalt von der Gefahr wusste und einen fleißigen Eindruck machte. Aber dann bekam ich es mit der Angst. Die Kameraden wollten immer mehr, und ich wusste, wenn die Sache auffliegt, würde ich am nächsten Tag in der kalten Erde liegen.

Schließlich stand das Schicksal wieder auf meiner Seite. Von ihrem Rückzug aus Italien hatten die Deutschen Werkzeugmaschinen mitgebracht, und eines Tages kamen zwei Lastzüge mit erstklassigen Maschinen der Firma Olivetti nach Buchenwald. Als wir gerade beim Abladen waren, schaute ein Mann mich an, als würde er mich kennen. ›Herzstark?‹ ›Ja, Herzstark‹, sage ich – und er antwortet: ›Walther‹«.

Fritz Walther, Herzstarks Konkurrent aus besseren Zeiten, war nun wieder Waffenfabrikant. »Er legt mir eine Packung Zigaretten auf die Drehbank, und ich denke ›Jetzt ist es aus‹. Der Kontakt zwischen uns Häftlingen und denen da war ja strengstens verboten. Aber der Wachmann schaute weg, und ich durfte die Zigaretten einstecken.« Walther, damals eine Berühmtheit, begriff sogleich, dass Herzstark viel bedeutsamer war als jede italienische Kriegsbeute, und wurde umgehend bei dem Lagerkommandanten vorstellig.

Bald darauf wurde Herzstark von seinem Vorgesetzten beiseite genommen. »›Herzstark, Sie haben da doch an einer neuen Sache gearbeitet, einer kleinen Rechenmaschine. Wissen Sie, da könnte ich Ihnen einen Tipp geben. Wir erlauben Ihnen, daran weiterzuarbeiten. Sie können die Zeichnungen machen, und wenn die Maschine wirklich funktioniert, werden wir sie nach dem Endsieg dem Führer zum Geschenk machen. Und sicherlich werden Sie dann arisiert.‹«

»Mein Gott«, dachte sich Herzstark, »mit der Maschine kannst du dein Leben strecken. Und da habe ich angefangen, die Curta so zu zeichnen, wie ich sie mir immer vorgestellt hatte.«

Die Curta auf dem Papier

Die SS befreite Herzstark zwar nicht von seinen Pflichten, in seiner freien Zeit aber durfte er sich seiner Rechenmaschine widmen. Ob in der Zelle, in der Werkstatt oder beim Essen: Sonntagmorgens und -abends nach dem Appell brachte er mit seinem Bleistift die Maschine zu Papier – ganz präzise, mit allen Maßen und Toleranzen.

Unterdessen begannen die Alliierten mit der Bombardierung. »Mittags mussten wir immer raus aus der Fabrik, und da sahen wir dann die amerikanischen Flugzeuge in Christbaumformation. Es war wunderbar anzuschauen, diese silbernen Vögel – und keine Flugabwehr. Wir haben nicht ein deutsches Flugzeug gesehen. Dann kamen die Bomben, wir sahen die Blitze und zählten die Sekunden bis zum Knall: acht, neun, zehn. Mit 333 malgenommen konnte man die Entfernung der Einschläge ausrechnen. Doch eines Tages flog der Christbaum in unsere Richtung. Wir hatten schreckliche Angst. Ich rannte in ein Wäldchen, steckte die Nase ins Moos und hielt mir die Ohren zu. Im nächsten Moment ging das Getöse los. Doch bald war Schluss, und wie ich den Kopf hob, war alles verräuchert. Ich konnte kaum atmen.

Ein paar hundert Häftlinge waren verletzt worden. Schrecklich, wenn man so etwas sieht. Dabei waren wir vom Lagerleben manches gewöhnt. Wenn jemand gehängt wurde, mussten wir alle so lange zuschauen, bis er wirklich tot war. Die Menschen wurden so hingerichtet, dass sie möglichst langsam starben.

Es gab auch Wachmänner, die waren gar nicht so verkehrt. Einer hat mich manchmal gefragt: ›Na, was gibt's Neu- ▷

es? Welche Maschinen wollen wir uns heute anschauen?‹ Man hat die unterschiedlichsten Typen kennen gelernt. Am gefährlichsten waren die jungen SS-Leute. Die hatten ja in Wahrheit Minderwertigkeitskomplexe und fanden immer irgendetwas. Die haben provoziert und konnten dann drauflosschlagen.«

Am 11. April 1945 – Curt Herzstark war mit seinen Zeichnungen fast fertig – fuhren plötzlich amerikanische Jeeps durch das Lager, und einer der GIs rief: »Ihr seid frei!« Manche der Soldaten waren Juden, die vor Hitlers Machtergreifung in die USA ausgewandert waren. Sie konnten Deutsch sprechen und wurden deshalb an der Front eingesetzt.

Buchenwald war das erste Konzentrationslager, das von den alliierten Truppen befreit wurde. Beim Anblick der Leichenstapel mussten sich viele amerikanische Soldaten übergeben. Herzstark erinnert sich an diese Zeit mit ratlosem Kopfschütteln. »Diese Bilder, das alles ist so unglaublich. Mir haben der Herrgott und mein Beruf geholfen. Wäre ich ein Rechtsanwalt gewesen, hätten die mich in einen Steinbruch geschickt, und nach zwei Tagen hätte ich eine Lungenentzündung gehabt und aus. So sind doch Tausende zu Grunde gegangen.«

Flucht nach Wien

Ein paar Tage nach der Befreiung Buchenwalds wanderte Herzstark mit seinen Zeichnungen nach Weimar und besuchte eine der wenigen heil gebliebenen Fabriken. Er erinnert sich noch genau an die Konstrukteure von Rheinmetall: »Es war, als fielen ihnen die Schuppen von den Augen.« Die Zeichnungen Herzstarks aus dem Konzentrationslager waren so gut, dass innerhalb von zwei Monaten drei Prototypen angefertigt werden konnten.

Doch gerade als es an die Aushandlung der Verträge ging, standen die Russen vor der Tür. Herzstark ahnte gleich die Gefahr, nahm die Prototypen an sich, zerlegte sie sorgfältig und verwahrte sie in einer Schachtel. Sie sollten aussehen wie Spielzeug. Hastig machte er sich auf nach Wien. Er schlief im Freien, ging zu Fuß oder tauschte Zigaretten gegen Zugfahrkarten. In der alten Fabrik seines Vaters baute er die drei Prototypen zusammen und ließ sich seine Erfindung durch Patente schützen.

Jetzt galt es, Investoren zu finden; doch der Erfolg ließ auf sich warten. Der amerikanische Büromaschinenhersteller Remington-Rand zeigte zunächst Interesse, meldete sich dann aber nie wieder. Auch die österreichische Regierung war an einer finanziellen Unterstützung nicht interessiert. Europa lag in Schutt und Asche und war bankrott.

Dann wurde Herzstark ins Wiener Palais Liechtenstein gebeten, um seine Maschinen den Prinzen Karl Alfred und Ulrich sowie Patentanwälten und Technikern zu demonstrieren. Wenig später wurde er vom Fürsten Franz Josef II. höchstselbst nach Liechtenstein eingeladen. Der hatte Pläne, sein kleines Land zu modernisieren, denn seinerzeit war es überwiegend landwirtschaftlich geprägt. Industrie gab es kaum; die größte Fabrik des Landes stellte Zahnersatz her. »Hier wurde ich dem Fürsten in seinem Schloss vorgestellt – der hat selber mit diesen Prototypen gerechnet. Es waren noch andere Familienmitglieder und Fachleute dabei. Der Fürst war begeistert, er hat mich reizend empfangen, und wir haben uns vier Stunden lang unterhalten.«

Firmengründung in Liechtenstein

Und so nahmen die Dinge zunächst einen guten Verlauf. In Liechtenstein wurde die Contina Bureaux- und Rechenmaschinenfabrik Aktiengesellschaft gegründet. Herzstark wurde ihr technischer Direktor und sollte ein Drittel der Aktien sowie für jede verkaufte Maschine fünf bis sechs Franken erhalten. Er stellte Leute ein und mietete den Ballsaal eines Hotels, wo bald die ersten 500 Curta-Rechenmaschinen gebaut wurden. Ursprünglich sollte Herzstarks Erfindung übrigens Liliput heißen, doch gefiel dieser Name der kaufmännischen Abteilung nicht. Nach langem Hin und Her warf dann eine zufällig anwesende Korrespondentin aus Holland ein: »Der Erfinder heißt Curt, und die Maschine ist seine Tochter. Wollen wir sie nicht einfach Curta nennen?«

Die Curta kommt 1948 in den Handel. Herzstark reist von Messe zu Messe und lässt Werbeanzeigen drucken. Als wenig später eine amerikanische Firma 10 000 Maschinen ordert, lehnt der Finanzvorstand von Contina jedoch ab. Der Auftrag sei zu groß. Durch diese Fehlentscheidung ist die Curta schließlich nur über den Versandhandel und in wenigen Spezialgeschäften erhältlich. Aber die Nachfrage steigt, und Contina zieht vom Hotel in eine eigene Fabrik, in der bald einige hundert Maschinen pro Monat hergestellt werden.

Es gab nur einen Verlierer: Curt Herzstark. Hinter seinem Rücken reorganisierten die Geldgeber das Contina-Werk und verweigerten ihm das versprochene Aktienpaket. Genau wie Edison, Tesla und viele andere Erfinder sollte auch Curt Herzstark um seine eigene Erfindung betrogen werden – bis sich das Blatt erneut zu seinen Gunsten wendete. »Ich konnte mein Glück erst gar nicht ahnen: Alle Patente liefen noch auf meinen Namen!« Die Vermögensverwalter hatten bei Firmengründung absichtlich auf deren Umschreibung verzichtet, damit im Falle einer Anfechtung alle Ansprüche nicht gegen sie, sondern allein

24 Jahre lang war die Curta bei Buchhaltern und Ingenieuren, aber auch bei Rallyefahrern überaus beliebt.



BEIDE ANZEIGEN MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON JAN MEYER

Rechnen mit der Curta

Die Funktion der Curta erschließt sich am besten beim Rechnen. Wer keine Curta sein Eigen nennen kann, findet auf der Webseite von Jan Meyer (www.curta.de) einen raffinierten Simulator.

Umdrehungszählwerk
Kurbel
Löschhebel
Resultatzählwerk

Resultatzählwerk
Einerstelle
Zehnerstelle
Zehnerschieber
Schaltstift
Übertragszahn
Zehnerschaltrad
Übertragsrückstellung
Zehnerschaltkörper
Einstellrad
Sperrrad für Subtraktion

GRIFF WASON; QUELLE: CLIFF STOLL, RICK FURR UND WWW.VCALC.NET

Addition

32 + 41 + 49 = ?

1. *Maschine rechenklar: Bringe die Kurbel in Grundstellung, drehe den Löscherhebel, um die Zählwerke auf dem Rundwagen auf Null zu stellen.*

2. *Schiebe den äußeren rechten Einstellgriff 1 auf »2« und den Einstellgriff 2 daneben auf »3«.* In der Anzeige oberhalb der Einstellgriffe erscheint nun die Zahl 32.

Durch Bewegung des Einstellgriffs dreht sich eine gerasterte Einstellachse und mit ihr das Zahlenrad der Einstellkontrolle. Zugleich wird auf einer zweiten Achse, der Übertragungsachse, das Einstellrad in Position gebracht. Es stellt den Schluss mit der Staffelwalze her – in unserem Beispiel dort, wo die Staffelwalze drei (Zehnerstelle) beziehungsweise zwei (Einerstelle) Zähne hat.

3. *Drehe die Kurbel um eine Umdrehung.* Mit der Kurbel dreht sich auch die Staffelwalze, die mit ihren Zähnen die Einstellräder und so die Übertragungsachsen dreht. Über den Triebstock wird die Drehung auf die Rädchen der Zählwerke des Rundwagens übertragen. Im Resultatzählwerk steht nun die Zahl 32, während im Umdrehungszählwerk die Zahl der Operationen angezeigt wird – also 1.

4. *Stelle durch Schieben der Griffe 1 und 2 die Zahl 41 ein.*

5. *Drehe die Kurbel um eine Umdrehung.* Im Resultatzählwerk wird das Ergebnis 73 angezeigt.

6. *Stelle durch Schieben der Griffe 1 und 2 die Zahl 49 ein und drehe die Kurbel um eine Umdrehung.* Im Resultatzählwerk erscheint das Ergebnis 122.

Diese letzte Addition erfordert den Übertrag einer Eins auf die Zehnerstelle. Wenn das Ziffernrädchen der Einerstelle im Resultatzählwerk über die Neun hinausdreht, drückt ein kleiner Schaltstift über den Zehnerschieber das Zehnerschaltrad der nächsthöheren, in diesem Fall der Zehnerstelle, nach unten und koppelt mit dem Zehnerschaltkörper. Ein Zahn des rotierenden Zehnerschaltkörpers dreht sodann die Übertragungsachse der Zehnerstelle und dreht die Anzeige um eine Ziffer weiter.

Subtraktion

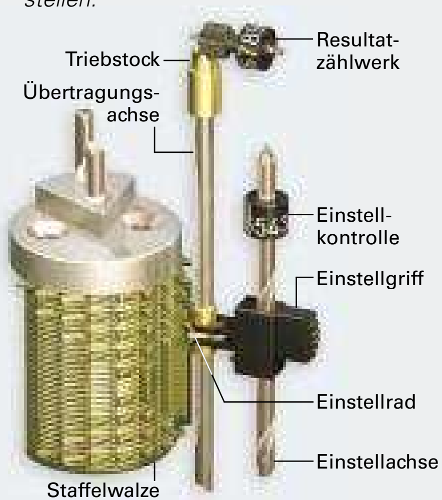
139 – 78 = ?

1. *Maschine rechenklar.*

2. *Mit den Griffen 1 bis 3 die Zahl 139 einstellen.*

3. *Drehe die Kurbel um eine Umdrehung. Im Resultatzählwerk erscheint die Zahl 139.*

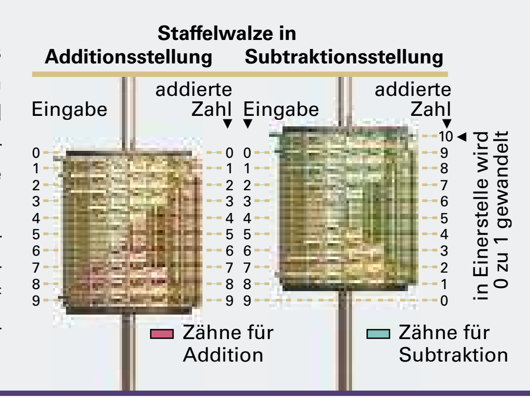
4. *Mit den Griffen 1 und 2 die Zahl 78 einstellen.*



5. *Hebe die Kurbel an, um die Zahnräder der Übertragungsachsen mit den Komplementzähnen der Staffelwalze zu koppeln. Drehe die Kurbel um eine Umdrehung.*

6. Im Resultatzählwerk erscheint das Ergebnis 61.

Die Curta subtrahiert, indem sie das (Neuner-)Komplement addiert. Wenn die Staffelwalze mit der Kurbel angehoben wird, koppelt das Einstellrad der »7« an die entsprechene Staffelwalzenscheibe mit zwei Zähnen. Das Einstellrad der »8« greift in die Scheibe mit einem Zahn, das der »0« hingegen in die Scheibe mit neun Zähnen. Mit einer Kurbelumdrehung wird die Komplementärzahl von 78 – also 21 – addiert. Auf dem Papier gerechnet, käme man an dieser Stelle auf das Ergebnis 160. Um zunächst die Hunderterstelle – die 1 – zu eliminieren, läuft die Übertragungsachse ganz links ohne Zehnerschieber. Auf diese Weise lässt die Curta die Überlauf-Eins verschwinden. Und noch etwas: Nach dem Anheben der Kurbel verfügt die Übertragungsachse der Einerstelle über ein zweites Einstellrad, welches bei der normalen Addition funktionslos ist. Bei der Subtraktion koppelt dieses so genannte Sperrrad hingegen in die Staffelwalzenscheibe direkt über der des ersten Einstellrades. Dreht sich die Staffelwalze, wird auf diese Weise über die obere Scheibe zu dem Ergebnis der Einerstelle eine 1 addiert. Im Resultatzählwerk erscheint somit 61 und nicht 60.



▷ gegen Curt Herzstark gerichtet würden. Doch nun hatte die Firma keinerlei Rechte an der Rechenmaschine und musste die Forderungen Herzstarks erfüllen. So hat die Curta ihrem Erfinder wenigstens in den 1950er und 1960er Jahren tatsächlich Geld eingebracht.

Nach diesem Erfolg konstruierte Herzstark zwar bald ein zweites Modell mit 15 anstelle von elf Stellen, seither hat sich aber – abgesehen von einigen Details – an der Curta nichts mehr geändert. Die Maschine war von Anfang an perfekt und erfreute sich zwei Jahrzehnte lang stetiger Nachfrage – »eine leistungsfähige, solide Universalrechenmaschine im Taschenformat«, wie es in einer Anzeige hieß. Mit der Curta wurden Bilanzen erstellt, Landkarten vermessen und Satellitenbahnen errechnet.

Ganz besonderer Gunst erfreute sich die Maschine übrigens bei Rallyefahrern. Mit der handlichen und stabilen Curta konnten sie rasend schnell Geschwindigkeiten und Strecken kalkulieren. Der Beifahrer konnte die Zahlen eingeben, ohne den Blick von der Piste zu wenden. Zudem passte die Maschine ins kleinste Handschuhfach und fiel – anders als die erste elektronische Konkurrenz – auch auf der holprigsten Strecke nicht aus. Bis heute rechnen viele Teilnehmer von Veteranenrallyes mit einer alten Curta.

Aber schließlich gruben die elektronischen Taschenrechner auch diesem Wunderwerk der Mechanik das Wasser ab. Anfang der 1970er Jahre verließen die letzten von insgesamt rund 150 000 Curtas das Werk in Liechtenstein.

Herzstark hatte das Contina-Werk schon Anfang der 1950er Jahre verlassen, war einige Jahre als Berater für deutsche und italienische Büromaschinenhersteller tätig und lebte in einer bescheidenen Liechtensteiner Wohnung. Auch Genies konnten in jener Zeit kaum Millionen verdienen. Erst im Alter von 84 Jahren erhielt er von der Regierung seiner Wahlheimat die Anerkennung für seine Verdienste. Am 27. Oktober 1988 ist Curt Herzstark im Alter von 86 Jahren gestorben.

Zuverlässig wie eh und je

Heute könnte sich die Curta allenfalls bei Batterie- und Stromausfall gegen Taschenrechner und PC durchsetzen. Doch wenn ich Herzstarks kleine Maschine in den Händen halte – mein Astronomieprofessor hat sie mir vermacht –, dann wird mir klar: Diese Curta hat ihren ersten Besitzer überlebt und wird sicher auch ihren zweiten überdauern. In der Gebrauchsanweisung steht: »Deine Curta wird dir als eine unermüdliche und unauffällige Helferin immer buchstäblich zur Hand sein. Auf stets präzise Leistung kannst du dich bei der Curta verlassen. Sie ist auf Grund von jahrzehntelangen Erfahrungen im Rechenmaschinenbau konstruiert und wird in einer modern eingerichteten Fabrik von internationalen Spezialisten der Feinmechanik in bester Qualitätsarbeit aus hochwertigen Metallen hergestellt. Es kommen keinerlei Kunststoffe zur Verwendung.« Man stelle sich nur einmal vor, es würde heute heißen: »Ihr Excel-Programm rechnet stets präzise« oder »der Pentium-Mikropozessor hält ein Leben lang«. Obwohl ja beides irgendwie richtig ist.



Da ich glaube, nur dann etwas wirklich zu besitzen, wenn ich es verstehe, und ich nur verstehe, was ich sehe, nehme ich Lupe, Pinzette und Feinmechanikerwerkzeug zur Hand und zerlege meine Curta in ihre beinahe 600 Einzelteile. Vorsichtig entferne ich die acht Einstellschieber, jeder mit einer schraubenförmigen Nut versehen und vor vielen Jahren von Curt Herzstark ersonnen – ganz allein und ohne Zeichenstift. Jetzt wird die geniale Staffelwalze sichtbar, die Herzstark unter den unvorstellbar elenden Verhältnissen im Konzentrationslager Buchenwald zu Papier brachte. Ich streiche über Achsen aus Leichtmetall-Legierungen, die damals allenfalls im Flugzeugbau verwendet wurden, und ich spüre mit den Fingern die Finesse eines halben Jahrhunderts mechanischer Rechenfertigkeit. Ob ich der absoluten Präzision der Curta vertraue? Absolut!

Nachdem die Maschine wieder zusammengesetzt ist, dividiere ich 355 durch 113. Mit meinem Daumen bewege ich die Einstellschieber und bringe mit einer Kurbelbewegung die erste Zahl ins Hauptzählwerk. Nach Eingabe der zweiten Zahl ziehe ich die Kurbel ein Stück heraus und setze so mit einer Drehung der Staffelwalze das Räderwerk des Neunerkomplements in Bewegung. Triebstöcke übersetzen diese Bewegung über winzige Planetengetriebe auf die Magnesiumrädchen des Resultatzählwerks, bis nach zwei Dutzend Kurbeldrehungen die Lösung in die kleinen Zahlenfenster schnappt – eine Approximation an die Kreiszahl π.

In meiner Hand halte ich einen direkten Abkömmling der allerersten Rechenmaschinen überhaupt; ein Glanzstück mechanischer Handwerkskunst und zugleich Zeugnis der Lebensleistung eines einzelnen Mannes, der sie unter den traurigsten Umständen und im Angesicht des Todes erbracht hat. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Clifford Stoll machte sich in den frühen Tagen des Internets als Hacker einen Namen und schrieb darüber seinen Bestseller »Kuckucksei«. Er ist eigentlich promovierter Planetenforscher, beschäftigt sich aber überwiegend mit der Restaurierung mechanischer Rechenmaschinen und dem Bau Klein'scher Flaschen. Hin und wieder lehrt er an der Universität von Berkeley. Die Redaktion dankt Jan Meyer (www.curta.de) für seinen kompetenten Rat.

Neue Blicke auf alte Maschinen. Zur Geschichte mechanischer Rechenmaschinen. Von Martin Reese. Dr. Kovac, Hamburg 2002

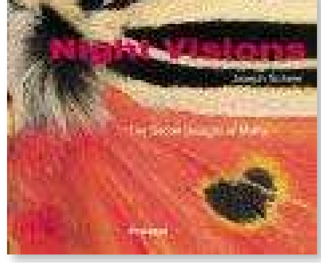
Die Welt der Rechenmaschinen. Von Alfred Waize. Desotron, Erfurt 1999

Antique office machines: 600 years of calculating devices. Von Thomas A. Russo. Schiffer Publications, Atglen 2001

The universal history of computing: from the abacus to the quantum computer. Von Georges Ifrah. John Wiley & Sons, New York 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

REZENSIONEN



ZOOLOGIE

Joseph Scheer

Night Visions

The Secret Designs of Moths

Prestel, München 2003. 120 Seiten, € 45,–

Der Autor Joseph Scheer, Professor für Printmedien und Co-Direktor des Institute of Electronic Art an der Alfred University in New York, hat zu später Stunde Nachtfalter gefangen, sie auf einen Scanner gelegt, mit hoher Auflösung eingescannt und die Bilder ausgedruckt – fertig. So könnte man die Entstehungsgeschichte des Buchs etwas salopp zusammenfassen. Keine Elektronenmikroskopie, keine Lichtmikroskopie, keine sonstigen wissenschaftlichen Verfahren.

Trotz der simplen Methodik ist ein ansehnlicher Bildband mit beeindruckenden, hochaufgelösten und farbigen Fotos entstanden. Die Bilder haben künstlerische Qualität und werden Insektenfreunde allemal begeistern. Wer Nachtfalter für eklige und hässliche Viecher hält, wird hier eines Besseren belehrt.

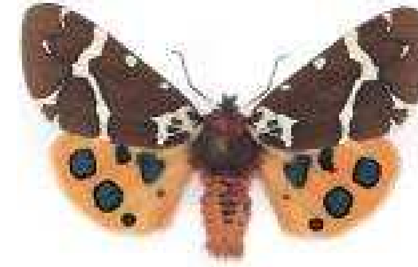
Über 200 Abbildungen geben einen kleinen Eindruck von der Reichhaltigkeit an Farben und Formen: Man erblickt fantastisch geschwungene Flügel, Leiber in verschiedenartigster Gestalt und Antennen mit geradezu außerirdischer Formgebung. Alle nur erdenklichen Farben bieten sich dem sinnenfreudigen Auge: von quietschbunt bis pastell, von matt bis schimmernd; einige Tiere sind weit gehend einfarbig, andere zeigen beeindruckende Streifen- und Fleckenmuster, einige sehen aus Gründen der Tarnung wie Baumrinde aus, andere täuschen große Augen oder Vögel vor.

Praktisch ist ein beigefügtes Kapitel mit einem Überblick über verschiedene Nachtfalter-Familien nebst Beschreibungen zur Anatomie und Lebensweise der Tiere. Am Anfang des Buchs finden sich kurze einleitende Beiträge von Scheer selbst und von Marc Epstein vom National Museum of Natural History in Washington. Hier erhält man wissenschaftliche Hintergrundinformationen und liest, wie das Buch zu Stande gekommen ist – nett und interessant.

Überflüssig und eindeutig deplatziert hingegen ist ein Beitrag der Medienwissenschaftlerin Johanna Drucker von der University of Virginia, der das Buch in irgendeine historisch-künstlerisch-philosophische Metaebene einzugliedern sucht. Und man sucht vergeblich nach einem Abbildungsmaßstab, der die reale Größe der Tiere verdeutlichen könnte. ◁

Frank Schubert

Der Rezensent ist promovierter Biophysiker und Wissenschaftsjournalist in Berlin.



▼ *Habrosyne scripta* (unten) mit einer Flügelspannweite von 3,5 Zentimetern gehört zur Familie der Spanner (Geometridae); der doppelt so große Braune Bär (*Arctia caja americana*, rechts) ist giftig und trägt entsprechende Warnfarben.



PHARMAZIE

Christian Rätsch und Claudia Müller-Ebeling

Lexikon der Liebesmittel

Pflanzliche, mineralische, tierische und synthetische Aphrodisiaka

AT, Aarau 2003. 784 Seiten, € 66,–

Was ist ein Aphrodisiakum? Alles, was die jeweilige Kultur dafür hält. Auf diese karge Definition müssen sich die Ethnologen Christian Rätsch und Claudia Müller-Ebeling in der Einleitung ihres Monumentalwerks zurückziehen. Denn es kommt auf die subjektive Wahrnehmung an: Ein Aphrodisiakum kann wirken, wenn man an seine Wirksamkeit glaubt – unabhängig von seiner stofflichen Zusammensetzung. Viagra ist in dieser Hinsicht eher untypisch.

Die Wirkung von Aphrodisiaka (so sie denn eine haben) lässt sich neurophysiologisch, psychologisch oder auch ethnologisch erklären; in jedem Fall sind »Dosis, Set und Setting« zu beachten, also die Menge des Mittels, die Stimmungslage und die unmittelbare Umgebung bei der Anwendung. »Je weniger man oder frau ein Aphrodisiakum benötigt, desto besser wirkt es«, stellen die Autoren ironisch fest.

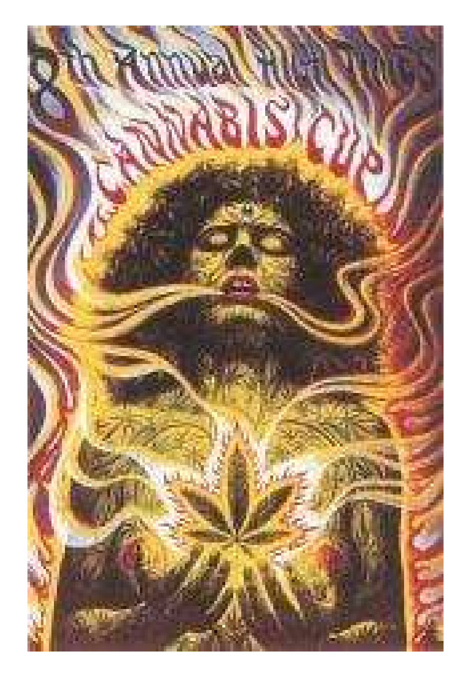
Dass die Liebesmittel bei uns mit gesellschaftlichen Tabus belastet sind, hängt nicht nur mit Macho-Ängsten zusammen – wenn man ihren Gebrauch zugibt, könnte Mann ja als Schlappschwanz dastehen –, sondern hat tiefere kulturelle Ursachen. Mit der Christianisierung des Abendlandes wurden nicht nur die alten Göttinnen dämonisiert, sondern auch die ihnen zugeordneten Mittel der Lusterregung und die Erotik allgemein. Zwei ausführliche Abschnitte über das Zusammenwirken der fünf Sinne beim Gebrauch der Liebesmittel und über deren Rezeption in der Kunstgeschichte beschließen den einleitenden Teil.

Das eigentliche Lexikon umfasst knapp 700 Seiten, gefolgt von einem Anhang mit ausführlicher Bibliografie und einem Index. Die Artikel sind übersichtlich aufgebaut – eine kurze Zusammenfassung am Anfang ist durch blaue Schrift abgesetzt – und werden in der Randspalte bereichert durch Literaturzitate, Abbildungen und gelegentlich auch chemische Strukturformeln. Zahlreiche Literaturhinweise und Fußnoten verweisen den Wissbegierigen auf weitere Quellen.

Nehmen wir als Stichprobe den etwa zweieinhalbseitigen Artikel über den Absinth, der in letzter Zeit wieder etwas in Mode zu kommen scheint. Zunächst werden andere Bezeichnungen genannt, etwa »die grüne Fee»; der kurzen Zusammenfassung in Blaudruck entnimmt man, dass Maler und Dichter im 19. Jahrhundert den Absinth als Inspirations- und Liebesmittel feierten. Es folgen Fakten über die Zusammensetzung des Getränks, die Art und Weise des Genusses und seine Wirkung, die als »deutlich stärker, visionärer und deliranter« als sonstige alkoholische Getränke beschrieben wird. Hier wünscht man sich etwas genauere und ausführlichere Angaben. Der »eigentliche« Absinth ist seit den frühen 1920er Jahren wegen der gesundheitsschädlichen Wirkungen des darin enthaltenen α-Thujons in den meisten europäischen Ländern verboten. Die heute legalen Absinthgetränke enthalten kaum noch Thujon – und bieten auch dessen Wirkung nicht mehr.

Der Artikel nennt die zahlreichen Maler und Literaten, die den »echten« Absinth priesen, erläutert die Rolle des Getränks in dem Film »Dracula« von Francis Ford Coppola und erzählt, dass ein Franzose namens Pernod 1797 in der Schweiz den ersten Absinth braute. Er gibt auch Rezepte zum Selbstbrauen an und weist darauf hin, dass stark thujonhaltiger Absinth in Tschechien und Slowenien legal hergestellt und verkauft wird. In diesem Zusammenhang fehlt eine deutliche Warnung: Die schädlichen Wirkungen des Thujons gehen weit über den üblen Kater am nächsten Tag hinaus.

Die Frage, ob Absinth bzw. Thujon physiologisch gesehen ein Aphrodisiakum ist oder nicht, bleibt unbeantwortet. Der Artikel schließt wie alle anderen mit Hinweisen auf Bezugsquellen (bei il- ▷



Die Grüne Göttin Hanf (Ölgemälde von Alex Grey, 1995)



Die Frau trinkt während der Vereinigung eine Schale Tee, um fit zu bleiben und vom Opium nicht einzuschlafen (Farbholzschnitt von Utagawa Kunisada).

▷ legalen Substanzen auf die Rechtslage) und Literaturangaben.

Der sechsseitige Stichworttext »Alraune« führt auf das Gebiet der Hexenkräuter, in dem sich die Autoren mehrfach als ausgezeichnete Kenner erwiesen haben. Schon im Alten Testament wird die »Königin der Zauberkräuter« als Aphrodisiakum erwähnt. Alraunehaltiges Bier besänftigte den Zorn der altägyptischen Göttin Sachmet/Hathor, und möglicherweise geht der griechische Aphroditenkult auf orientalische Vorstellungen von der Alraune zurück. Die Verfasser zählen penibel die zahlreichen Inhaltsstoffe der Wurzeln, Blätter und Früchte auf, geben ein Rezept zur Fabrikation eines »Mandragorenweins« an und verschweigen nicht ihre eigenen – eher gemischten – Erlebnisse nach dessen Konsum.

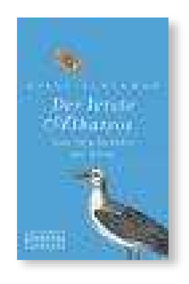
Drei knappe Stichwörter behandeln »Liebesdrogen«, »Liebestränke« und »Liebeszauber«. Während die Liebesdrogen (etwa die als Ecstasy oder MDMA bekannte Partydroge) nichts anderes sind als Derivate des Phenylethylamins, sind die Liebestränke nicht so einfach zu bestimmen. Der garantiert wirkende Trank, der in einem Menschen die Liebe zu einem anderen entzündet (bekanntestes Beispiel sind Tristan und Isolde), ist eine Fiktion, auch wenn es dazu unzählige Rezepte gibt und auch kommerziell erhältliche Präparate. Der Liebeszauber schließlich ist ein rein magisches Ritual ohne pharmakologisch wirksame Substanzen. Heute noch vielfach praktiziert werden Voodoo auf Haiti und Candomblé in Brasilien.

Auch bei flüchtigem Durchblättern liest man sich schnell fest. Wer hätte gedacht, dass ausgerechnet Nacktschnecken als Aphrodisiakum gelten (in China) oder dass in Südamerika eine Pflanze mit dem schönen Namen »Justizia« zur Erregung der Lust gebraucht wird?

Das Buch enthält eine Fülle von Informationen, nicht nur zur Pharmakologie und Physiologie, sondern auch zur Kultur-, Literatur- und Kunstgeschichte der Aphrodisiaka. Damit reicht es weit über den Rang eines simplen Nachschlagewerks für Lüstlinge hinaus und zeichnet ein detailliertes und insgesamt auch zuverlässiges Bild von einem weithin tabuisierten, aber wesentlichen Bestandteil menschlichen Lebens und Handelns. ◁

Claus Priesner

Der Rezensent ist Redakteur der Neuen Deutschen Biografie in der Historischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.



EVOLUTION

Diane Ackerman

Der letzte Albatros

Vom Verschwinden der Arten

Aus dem Amerikanischen von Harald Höfner und Brigitte Post.
Europa, Hamburg 2003. 288 Seiten, € 22,90

»Unbewusst halten wir Aussterben für das höchste Versagen. Wir machen uns nicht klar, dass es normal ist.« So fatalistisch scheint die amerikanische Schriftstellerin Diane Ackerman auf den ersten Blick dem massiven Artensterben gegenüberzustehen, das sich derzeit auf unserem Planeten abspielt. Für sie ist es Teil des natürlichen Wandels, dem die Erde seit Anbeginn unterliegt. Dass auch der Mensch als Verursacher von Überbevölkerung und Ressourcenknappheit irgendwann vom Erdboden verschwinden wird, ist für sie eine denkbare, evolutionsgeschichtlich logische Konsequenz.

Dieser nüchternen Sichtweise zum Trotz spricht aus den Worten Diane Ackermans tiefe Besorgnis darüber, dass der Mensch, als einziges vernunftbegabtes Wesen, die Welt verwandelt, ohne sie wirklich zu begreifen; dass er seine eigene Existenzgrundlage zerstört, indem er seine Umwelt unwiderruflich verarmen lässt. Das Buch ist ein Zeugnis ihrer innigen Verbundenheit mit allem Lebenden. In diesem Sinne versteht die Autorin ihre Reisen zu den letzten Zufluchtsstätten aussterbender Arten als »Pilgerfahrten«, auf denen sie das Verschwinden exotischer Tiere als Zeitzeugin dokumentiert.

Aussterben ist der Normalfall und Überleben die Ausnahme – auch für den Menschen

Die Reise beginnt auf der karibischen Inselgruppe French Frigate Shoal, dem letzten großen Refugium der Hawaii-Mönchsrobben. Forscher markieren die Jungtiere, um den Zustand der Population zu überwachen – ein dramatisches Unterfangen, bei dem die Autorin selbst ganzen Körpereinsatz leisten muss. In der ohnehin sehr kleinen Population leben auch noch weit weniger Weibchen als Männchen. Das veranlasst Letztere dazu, in brutaler Weise über ihre weiblichen Artgenossen herzufallen, was nicht selten deren Tod bedeutet.

Die Reise führt weiter in die Tiefen des Amazonasdschungels. Das üppige Grün des tropischen Regenwalds und die unvorstellbare Vielfalt des Lebens entführen den Leser in eine Welt voll Sinnlichkeit und Fantasie. Schmerzlich wird klar, welch unwiederbringlichen Verlust die radikale Zerstörung dieser grünen Schatzkammer darstellt, nicht zuletzt wegen der großen Fülle an medizinisch wirksamen Substanzen, die wir ihr entnehmen.

Beeindruckend schildert Diane Ackerman ihre Reise zur letzten Zufluchtsstätte der Kurzschwanzalbatrosse auf der japanischen Vulkaninsel Torishima, die für den Menschen praktisch unzugänglich ist. Nachdem die Population der großen Seevögel vor einigen Jahrzehnten auf nur zehn Exemplare abgesunken war, wuchs sie in diesem Versteck wieder auf 400 Tiere an. Aber noch immer hängt ihre Existenz am seidenen Faden. Um den letzten Vögeln dieser Art gebührend zu huldigen, reist Diane Ackerman ans andere Ende der Welt, erklimmt Vulkane und seilt sich über scharfkantigen Steilküsten ab.

Goldgelbe Löwenäffchen gehören zu den am stärksten bedrohten Tierarten dieser Welt. Wegen ihres sehr komplizierten Sozialsystems haben diese monogamen Miniaffen es schwer, in der freien Wildbahn zu überleben. Der Leser verfolgt die Auswilderung einer Löwenäffchenfamilie aus dem Zoo und erlebt ein bühnenreifes Spektakel, während die »Patchworkfamilie« versucht, im brasilianischen Urwald Fuß zu fassen.

Ob Diane Ackerman sich zu den Forschern in die Wildnis wagt, die durch Autobahnen oder Siedlungen zugeschütteten Winterquartiere des Monarchfalters aufsucht oder dem amerikanischen Insektenforscher Thomas Eisner über die Schulter schaut: Stets weiß sie durch ihre Leidenschaft und ihren mitreißenden Erzählstil nachhaltiger vom unersetzbaren Wert der Artenvielfalt zu überzeugen als jeder Sachvortrag. ◁

Pia Prasch

Die Rezensentin ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.



MATHEMATIK

Karl Günter Kröber

Ein Esel lese nie

Mathematik der Palindrome

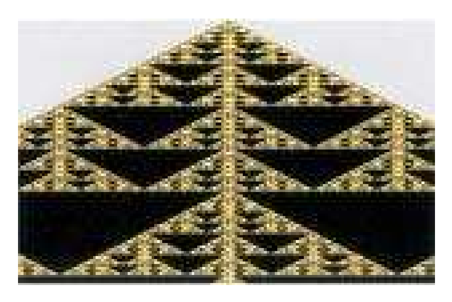
Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek 2003. 349 Seiten, € 9,90

Am Anfang war das Palindrom. Mit dem Satz »Madam, I'm Adam« stellte sich Adam im Paradies der Eva vor. Palindrome sind Wörter oder Sätze, die von links nach rechts gelesen genauso lauten wie von rechts nach links. Man trifft sie in allen Sprachen: »Lagerregal«, »Reliefpfeiler«, »Ein Neger mit Gazelle zagt im Regen nie«, »Ein Esel lese nie«, »Saippuakauppias« (finnisch: Seifenhändler).

Auch unter den Zahlen gibt es Palindrome wie 121, 2002 und 1234321, sogar beliebig viele; aber genau deswegen sind sie nicht besonders reizvoll. Interessant wurden sie erst, als Anfang des letzten Jahrhunderts eine hübsche mathematische Spielerei entdeckt wurde: Man nimmt irgendeine natürliche Zahl und addiert dazu ihre Umkehrzahl, das ist die Zahl, die entsteht, wenn man die Reihenfolge der Ziffern umkehrt. Mit dem Ergebnis der Addition verfährt man dann wieder genauso und wiederholt diesen Prozess so lange, bis man schließlich ein Palindrom erhält. Ein Beispiel: $69+96=165$, $165+561=726$, $726+627=1453$, $1453+3541=4994$. Nach der vierten Addition ist das Palindrom 4994 entstanden, die »palindromische Ordnung« von 69 ist folglich 4. Sie ist bei vielen Zahlen ähnlich klein, andere wiederum, wie zum Beispiel 196, weigern sich hartnäckig, auch nach sehr vielen Schritten ein Palindrom zu bilden.

Anstelle der Summe aus Zahl und Umkehrzahl kann man deren Differenz bilden, oder immer abwechselnd die Summe und die Differenz, oder in irgendeiner anderen Abfolge Summen und Differenzen. Außerdem ist man nicht auf die Dezimaldarstellung der Zahlen beschränkt, sondern kann das Verfahren auf andere Zahlensysteme erweitern.

Mit diesen Verfahren hat sich der Mathematiker und Philosoph Karl Günter Kröber in seinem Buch eingehend befasst. Je nachdem, wie die Zahlen sich beim Palindromisieren verhalten, teilt er sie in Klassen ein, deren Eigenschaften er detailliert untersucht. Wenn man die Ziffern der Zahlen in einer Palindromisierungsfolge durch verschiedene Farben darstellt, entstehen sehr hübsche Muster (oben), die sich durchaus mit den Bildern von Fraktalen messen können; sie sind im Mittelteil des Buchs auf sechzehn farbigen Hochglanzseiten wiedergegeben.





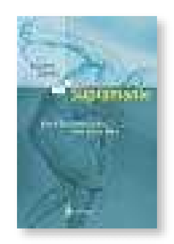
Palindromisierungsfolge einer Zahl im Neunersystem (oben) und im Fünfersystem (unten). Die Abfolge der Additionen und Subtraktionen hat die Periode 11 beziehungsweise 36.

Kröber sieht Anwendungen seiner Verfahren in Molekularbiologie und Kristallografie; so verweist er darauf, dass palindromische Strukturen in der Erbsubstanz DNA vorkommen. Ob seine Analyse für die Anwendungen etwas einbringt, muss sich aber erst noch zeigen.

Wer gerne und lange mit Zahlen spielt, verborgene Zusammenhänge zwischen ihnen entdecken möchte, sie sortiert und katalogisiert, Zahlenspielereien auf dem Computer programmiert und in farbige Grafiken umsetzt, dem kann Kröbers Buch wärmstens empfohlen werden. Wer leicht verdauliche mathematische Unterhaltung sucht, den wird das 350 Seiten starke Buch jedoch schnell ermüden. ◁

Heinrich Hemme

Der Rezensent ist Professor für Physik an der Fachhochschule Aachen.



MANAGEMENT-PHILOSOPHIE

Gunter Dueck

Supramanie

Vom Pflichtmenschen zum Score-Man

Springer, Heidelberg 2004. 350 Seiten, € 34,95

Die herkömmliche Auffassung des menschlichen Arbeitslebens »erfährt in diesen Jahren eine Revolution«. Die Arbeitswissenschaftler haben erkannt, dass der Mensch die klassische Forderung nach Disziplin und Pflichttreue zwar erfüllen kann, aber nur durch Unterdrückung seines eigenen Willens und seiner Begierden. Einen wesentlichen Teil seiner Energie setzt er also nicht für die Arbeit ein. Kann man diese Energien mobilisieren? »Lässt sich Gier oder Siegeswille in Arbeit verwandeln?«

Ja – und zwar im Prinzip ganz einfach. Man stelle dem Menschen sein Gehalt nicht dafür in Aussicht, dass er tut, was ihm gesagt wird, sondern dafür, dass er auf irgendeiner Leistungsskala möglichst viele Punkte erreicht. Das klingt einleuchtend. Nicht Vernunft noch Intuition, sondern weit gehend unbewusste Triebe und Ängste bestimmen vorrangig das Verhalten des Menschen – Gunter Dueck, Mathematiker und Manager bei IBM, hat das in seinem letzten Buch »Omnisophie« (Spektrum der Wissenschaft 11/2003, S. 88) ausgeführt, indem er nicht drei Seelen in der Brust des Menschen, sondern drei sehr verschiedene Computer in seinem Hirn postulierte. Also appelliere man nicht an seine Vernunft oder sein Pflichtbewusstsein, sondern spreche durch gezielte Anreize die mächtigsten Triebfedern in seinem Innersten an: seine Geldgier und seine Angst vor Minderwertigkeit.

Für Verkäufer, die von Provisionen leben, ist das nichts Neues; neu ist, dass dieses Prinzip auf viele andere Berufe übertragen wird, auch solche, in denen die Leistung nicht an der Zahl gefertigter Werkstücke oder verkaufter Versicherungsverträge ablesbar ist. Wo ein solcher quantitativer Maßstab fehlt, wird flugs einer definiert. Und damit beginnt das eigentliche Übel.

Dueck beschreibt die Folgen aus profunder Insiderkenntnis. Bei allem, was der Mitarbeiter tut, denkt er an seine Punkte und handelt danach. Für Zusammenarbeit und Hilfe unter Kollegen ist da wenig Platz, denn das System der Punktezumessung ist so ausgelegt, dass alle Leistungen einzelnen Mitarbeitern zugerechnet werden (»accountability«). In der Regel misst ein solches Punktesystem nur einen Teil dessen, auf das es wirklich ankommt, und lädt damit zu widersinnigem Verhalten ein: Ein Verleger, dessen Leistung nur an der Anzahl publizierter Bücher gemessen wird, kann mächtig Punkte machen (und seinen Geschäftsführer positiv beeindrucken), indem er jede Menge Bücher auf den Markt bringt, die mangels Qualität besser ungedruckt geblieben wären.

Selbst wenn der Leistungsmaßstab an sich nicht zu beanstanden ist, kann die ausschließliche Orientierung an Kennzahlen zu absurden Ergebnissen führen. Beispiel »Mitarbeiterzufriedenheit«: Die Anzahl der Kündigungen ist ein guter Indikator. Was macht der Chef, ▷

▷ der auf der Skala »Mitarbeiterzufriedenheit« hohe Punktzahlen erzielen will? Er gewährt seinen Leuten reich dotierte Aktienoptionen, die man nur nutzen kann, wenn man in fünf Jahren noch bei der Firma ist. Daraufhin sinkt die Kündigungsrate – die Leute haben jetzt ja mehr zu verlieren –, aber die Zufriedenheit ist nicht angestiegen!

Alle Jahre aufs Neue schaut sich die oberste Geschäftsleitung der Firma die zahlreichen Kennzahlen an, mit denen der Zustand der Firma gemessen wird, findet eine, die im Argen liegt (Umsatz, Gewinn, Kundenzufriedenheit …), und gibt die Anweisung aus, diese und nur diese Kennzahl zu verbessern. Da schaudert es jeden Optimierer, und den Autor, der sich durch neue Optimierungsverfahren einen Namen gemacht hat, erst recht. Denn gerade wenn die Firma in einem optimalen Zustand ist, wird jedes Drehen an einer der zahlreichen Stellschrauben diesen Zustand zunächst verschlechtern.

Wenn im jährlichen Wechsel der Geschäftsziele die berüchtigte Konzentration auf die Kernkompetenzen angesagt ist, wird das schlechteste Drittel der Mitarbeiter entlassen. Durch die allgegenwärtigen Punktzahlen glaubt man genau zu wissen, wer das ist. Natürlich gibt sich jeder die größte Mühe, nicht zum schlechtesten Drittel zu gehören, und findet die abenteuerlichsten Wege, seine Punktzahl hochzutreiben, wenn ihm das durch ehrliche Arbeit nicht gelingt. Die Sammlung drastischer Beispiele zu diesem Thema – allenfalls leicht übertrieben, beteuert der Autor – war für mich der eindrucksvollste Teil des Buchs. Ich hätte nie gedacht, dass einige Geschichten aus den Hochburgen des Kapitalismus ausgerechnet Honeckerwitzen zum Verwechseln ähnlich sind. Dueck geht so weit, die jüngsten Bilanzskandale dem allgegenwärtigen Zwang zum Punktebetrug zuzuschreiben und die anhaltend hohe Arbeitslosigkeit der Tatsache, dass moderne Firmen für das unterdurchschnittliche Drittel ihrer Mitarbeiter keine Verwendung mehr zu haben glauben.

In den modernsten Firmen geht es zu wie in Honeckerwitzen

In seiner Darstellung ist die »Supramanie«, die Sucht, immer der Erste zu sein, eine Krankheit der Gesellschaft. Die Leidenden sind sowohl die »Leistungsträger«, die für viel Geld den höchsten Einsatz bringen, dafür alles andere im Leben hintanstellen und vom vorzeitigen »burnout« bedroht sind, als auch die Unterdurchschnittlichen, die mit dem Makel der persönlichen Minderwertigkeit leben müssen. Dinge, die das Leben lebenswert machen: Selbstachtung, Vertrauen, Identifizieren mit der Arbeit, Begeisterung, gehen unter in der ewigen Jagd nach den Punkten. Aber die Gesellschaft empfindet sich, zumindest in diesem Punkt, nicht als krank: Es florieren ja gerade die Firmen, die Supramanie praktizieren.

Was ist die Krankheitsursache? Ist es die »Omnimetrie« selbst, der Versuch, den ganzen Menschen durch Kennzahlen zu erfassen, oder nur die ungeschickte Anwendung der Omnimetrie, wie Dueck noch in seinem Buch »Wild Duck« annahm (Spektrum der Wissenschaft 11/2000, S. 101)? Diesmal spricht er nicht mehr davon, dass eine noch intensivere Verwendung von Kennzahlen dem Unfug mit den Kennzahlen ein Ende machen könne.

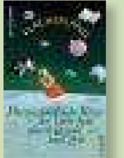
Was ist die Therapie der Krankheit? Ein »Zurück zu den alten Zeiten« ist illusorisch. Natürlich gibt es eine theoretische Lösung: »Wie wäre dies? Wir verzichteten auf zwanzig Prozent unseres Gehaltes und drehten das Übermaß der geforderten Arbeits- und Leistungsdichte wieder zurück? Wir bekämen wieder Anerkennung und Dank statt immer nur Geld? Wir würden hochleben statt höherwertig?« Aber Dueck beherrscht das Geschäft der Optimierung viel zu gut, um nicht zu wissen, dass die Gesellschaft als Ganzes sich nicht in diese Richtung bewegen wird.

Am Ende entlässt er den Leser ohne Trost. »Der Weise ist so ganz zerrissen. Kann der Welt denn überhaupt geholfen werden? Er weiß es nicht. Will sie sich helfen lassen? Definitiv nicht. Ist ihr klar, dass sie Hilfe braucht? Nicht wirklich. Dies ist Teil des Problems.« So muss er sich diesmal mit dem Versuch begnügen, der Welt – oder wenigstens dem Leser – das klar zu machen. Denn für den in die Zukunft gerichteten dritten Teil seiner Trilogie aus »Omnisophie«, »Supramanie« und »Topothesie« ringt der Autor noch mit Worten. ◁

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online



Ian Stewart
Flacherland
Die unglaubliche Reise der Vikki Line durch Raum und Zeit
C. H. Beck, München 2003, 384 Seiten, € 24,90

Der Roman »Flatland. A Romance of Many Dimensions« von Edwin A. Abbott (1884) erzählt die Geschichte eines Quadrates aus einer zweidimensionalen Welt, das eines Tages Besuch von einer Kugel, einem Lebewesen aus einer dreidimensionalen Welt, bekommt. Ian Stewart hat eine Fortsetzung des Romans verfasst. Vikki Line, eine Ururenkelin des Quadrates aus Abbotts Roman, reist unter der Führung eines »Space Hoppers« durch verschiedene Geometrien.

Die Erzählung ist mit lockerer Feder geschrieben, humorvoll und voller Seitenhiebe auf Politik und Gesellschaft. Gleichwohl ist der Stoff des Romans sehr abstrakt und schwierig. Für den mathematisch und physikalisch vorgebildeten Leser ist das Buch aber in jedem Fall ein Genuss.

Aus der Rezension von Heinrich Hemme

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	3
Vermittlung	5
Verständlichkeit	2
Lesespaß	3
Preis/Leistung	3
Gesamtpunktzahl	16

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/5x5

Die Weidenhalbierung

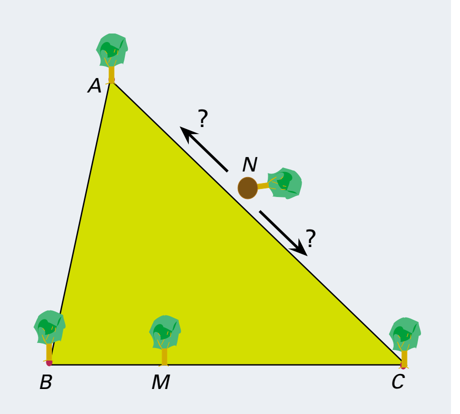
Von Pierre Tougne

Jans Weide ist ein Dreieck, das durch die Bäume *A*, *B* und *C* begrenzt ist. Von dem Baum *M* irgendwo auf der Strecke *BC* bis zu einem Baum *N*, der auf den Rand des Dreiecks zu pflanzen ist, will er einen geraden Zaun ziehen, der die Weide in flächengleiche Hälften zerlegt.

Wie konstruiert Jan den Standpunkt des Baumes *N*?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Blechschilder »Kamel«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 13. April 2004, eingehen.



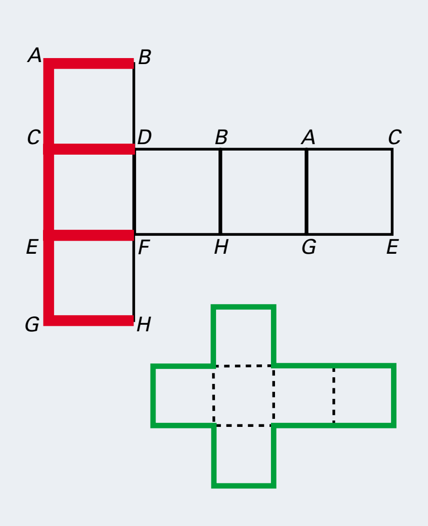
Lösung zu »Auf Stoß geklebt« (Februar 2004)

Paula verklebt mindestens die Länge $(4\times\sqrt{3}+6)$ dm ≈1,29 m.

Bernd Rümmler aus Göttingen formulierte das Rätsel um: »Wie lässt sich ein zusammengeklebter Würfel so aufschneiden, dass er sich zu einer flachen Figur ausbreiten lässt und die Länge des Schnitts möglichst gering wird?«

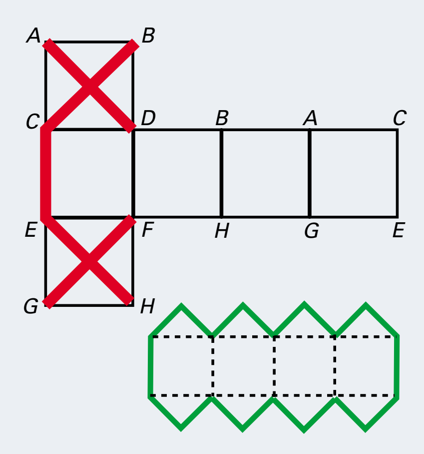
Damit das Papier flach liegt, muss der Schitt zusammenhängend sein und jede der acht Würfelecken erreichen. Die folgenden Skizzen zeigen in schwarzen Linien den intakten Würfel, der nur der Übersicht halber auf die übliche Weise zum Netz auseinander gewickelt ist; die roten Linien bezeichnen den Schnitt und die grünen das sich daraus ergebende Schnittmuster.

Ein Schnitt entlang von Kanten ergibt eines der klassischen Schnittmuster mit 14 dm Klebkante:

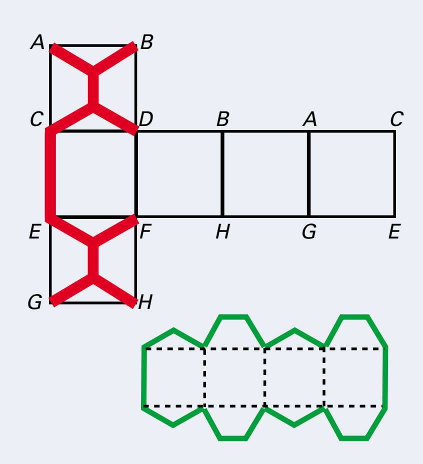


Ein Schnitt, der sich auf diese drei Quadrate beschränkt, erreicht bereits alle Ecken; ihn auf weitere Seitenflächen auszudehnen würde ihn höchstens länger machen.

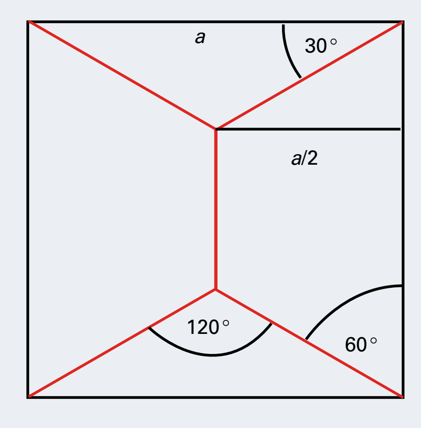
Verbindet man die Ecken des oberen und des unteren Quadrats nicht über die Kanten, sondern durch ein Kreuz, so kommt man auf eine Schnittlänge von $(8\times\sqrt{2}+2)$ dm ≈ 1,33 m:



Aber selbst dieses Schnittmuster ist noch verbesserungsfähig. Man ersetze in beiden Quadraten das Kreuz durch einen so genannten Steinerbaum; das ist die kürzeste Verbindung der vier Eckpunkte, bestehend aus einem Mittelast und vier Zweigen zu den Eckpunkten, die mit diesem Winkel von 120 Grad bilden (Skizze rechts). Die Gesamt-Schnittlänge lässt sich mit etwas Trigonometrie auf etwa 1,29 m beziffern. Kürzer geht es nicht, was sich über Verfahren der Analysis belegen lässt (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/1995, S. 10, und »Steiner trees for ladders« von F. Chung und R. Graham, Annals of Discrete Mathematics, Bd. 2, S. 173, 1978).



Die Gewinner der drei kinetischen Skulpturen »Jupiter« sind Richard Schrag, München; Hubert Kleinmanns, Groß-Umstadt; und Willi Botta, Rüttenen (Schweiz).



Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Steine flitschen

Einen flachen Kiesel mehrfach über die Wasseroberfläche hüpfen zu lassen erfordert keine große Kunstfertigkeit, sondern nur etwas Übung. Aber die Theorie dazu ist alles andere als einfach.

Von Christoph Pöppe

Eine nicht-olympische Sportart: Sie hat eine oberflächliche Ähnlichkeit mit dem Diskuswerfen. Es gilt, einen flachen, annähernd kreisförmigen Gegenstand möglichst weit von sich weg zu befördern. Aber olympische Weihen oder Kommerzialisierung sind nicht zu befürchten: Der – soweit erkennbar – einzige Verein, der den Sport ernsthaft betreibt und sogar einen jährlichen Meisterschaftskampf ausrichtet, trifft sich auf einer kleinen Insel namens Mackinac am Übergang zwischen Michigan- und Huron-See in Nordamerika. Man kennt sich, und der Preis für den Sieger motiviert kaum zum Doping: Es handelt sich um einen Jahresvorrat an »fudge«, jener amerikanischen Süßigkeit, die einem wegen ihrer Klebkraft lange im Gedächtnis – und vor allem an den Zähnen – haften bleibt. Immerhin gibt es einen quasi-offiziellen Weltrekord: Jerdone (»Jerry«) Coleman-McGhee ließ 1992 seinen Stein 38-mal springen, worin ihn bis heute niemand übertroffen hat.

Üblicherweise lassen Vater und Sohn im Wettstreit die Steinchen übers Wasser hüpfen, beim Waldspaziergang am stillen See oder am Rheinufer, wo der unerschöpfliche Vorrat an schönen flachen, ziemlich kreisrunden Kieseln die Nachteile der unruhigen Wasseroberfläche mehr als ausgleicht. Sohn ist bei diesem Spiel sogar geringfügig im Vorteil gegenüber Vater: Es fällt ihm leichter, sich beim Abwurf bis knapp über die Wasseroberfläche zu beugen.

Das ist eine der drei Voraussetzungen für einen erfolgreichen Wurf: Der Stein muss nicht nur flach sein, das heißt in einer gewissen Ebene viel weiter ausgedehnt sein als senkrecht zu dieser Ebene, sondern auch flach geworfen werden, sodass er die Wasseroberfläche nicht durchstößt, sondern möglichst nur streifend berührt. Genauer gesagt müssen sowohl der Vektor seiner Schwerpunktsgeschwindigkeit als auch seine Ebene beim Aufplatschen fast parallel zur Wasseroberfläche liegen (Kasten S. 108).

Zweitens muss der Stein rotieren. In einer idealen Welt wäre das nicht so dringend; aber in der Realität ist der Stein nicht ganz kreisrund, der See nicht spiegelglatt und der Werfer nicht beliebig geschickt. Die kleinen Abweichungen von der idealen Bahn würden spätestens beim ersten Platscher die Steinebene abkippen lassen; beim nächsten Mal trifft er nicht mehr flach auf, sondern irgendwie, worauf er versinkt. Der Drall verschafft der räumlichen Orientierung des Kiesels die erforderliche Stabilität.

Drittens muss man dem Stein ausreichend Bewegungsenergie mitgeben, damit er die Energieverluste durch Reibung am Wasser möglichst lange überlebt. Nach der Formel $E = mv^2/2$ erreicht man das sowohl durch hohe Geschwindigkeit als auch durch große Masse. Das ist die Stelle, an der Vater gegenüber Sohn im Vorteil ist: Mit seinen größeren Körperkräften gelingt es ihm leichter, auch schwere Steine noch in den schnellen Rotierflug zu versetzen. Wer den Weltrekord übertreffen will, tut gut daran, mit 100-Gramm-Brocken zu üben.

Leider sind richtig große Kiesel meistens nicht flach. Aber nach einem Hochwasser findet man am Ufer Bruchstücke von Kacheln oder Hohlziegeln, die schon flach waren, bevor das Wasser ihre Kanten rundschliff. Mir sind mit diesen und ähnlichen unkonventionellen Wurfgeschossen eindrucksvolle Sprünge gelungen: nicht besonders weit, aber hoch, und zwar dann, wenn ich sie mit hoher Drehzahl und entgegen der Theorie nicht flach, sondern ziemlich steil einwarf.

Was hindert den Stein am Einsinken? Die Oberflächenspannung, die Kraft, die den Wasserläufer trägt, ist es offensichtlich nicht. Ich werde es aus Umweltgründen nicht ausprobieren, aber ich bin überzeugt: Über einen Teich voller Spülwasser würde der Kiesel genauso hüpfen wie über einen klaren Waldsee.

Vielmehr wird der Stein von demselben Effekt getragen wie ein Wasserskifahrer: Das Wasser ist zwar bereit, beliebig weit auszuweichen, aber nicht beliebig schnell, jedenfalls nicht so schnell, wie der eindringende feste Gegenstand Druck macht. Die Trägheit des Wassers liefert also die Gegenkraft zum Gewicht des Steins oder des Wasserskifahrers. Dagegen spielt die Zähigkeit (Viskosität) der Flüssigkeit keine nennenswerte Rolle: Die Reynolds-Zahl für die Umströmung des Steins liegt unter realistischen An- ▷

FRANCIS DEMANGE / GAMMA / STUDIO X

Der Physiker Christophe Clanet bei experimenteller Arbeit

▷ nahmen – Größe des Steins einige Zentimeter, Geschwindigkeit einige Meter pro Sekunde – in der Größenordnung von einigen hunderttausend, während für viskose Strömungen sehr kleine Reynolds-Zahlen charakteristisch sind.

Damit gerät die theoretische Analyse in das notorisch schwierige Gebiet der Fluiddynamik. Wer wissen wollte, ob die Trägheit der Luft ein Flugzeug hebt, musste es ausprobieren, am realen Objekt auf dem Sandstrand oder am verkleinerten Modell im Windkanal. Erst neuerdings können computersimulierte Luftmoleküle die echten einigermaßen würdig vertreten; aber eine handliche Formel zur Lösung des Problems gibt es bis heute nicht. Und wer nimmt schon einen Supercomputer in Anspruch, um die Dynamik des Steineflitschens wissenschaftlich zu erfassen?

Dabei kommt das Problem in der ernsthaften Technik durchaus vor. Ein Raumflugkörper, der auf die Erde zurückkehren soll, muss hinreichend steil in die oberste Schicht der Atmosphäre eintauchen; sonst droht er von ihr reflek-

Wasserski-Springen oder der Kiesel auf dem See

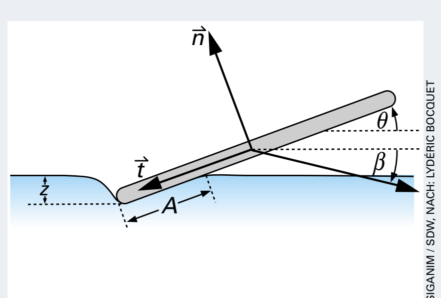
Stellen wir uns den Stein als annähernd kreisrunde Scheibe mit vernachlässigbarer Dicke vor. Sein Geschwindigkeitsvektor v bildet mit der Wasseroberfläche den kleinen (negativen) Winkel β. Sein Anstellwinkel θ (der Winkel der Scheibenebene gegen die Horizontale) muss klein und positiv sein, sodass der Stein »mit dem Hintern zuerst« das Wasser berührt. Wenn er »mit dem Kopf voraus« ins Wasser springt, dringt er auf der Stelle ein und geht unter. Einen erfolgreichen Sprung vollführt er nur, wenn seine Oberseite nicht oder kaum unter Wasser gerät; das wiederum gelingt nur, wenn auch die Unterseite nur teilweise eingetaucht ist.

Die Kraft, die das Wasser dem eindringenden Stein entgegensetzt, ist proportional zur wirksamen, das heißt das Wasser berührenden Oberfläche A und zum Quadrat der Auftreffgeschwindigkeit v. Wie in der Fluidmechanik üblich, zerlegt man diese Kraft in einen Auftriebsanteil $\vec{n}$ senkrecht zur Steinebene, der den Stein aus dem Wasser hebt, und einen Widerstandsanteil $\vec{t}$, der in der Steinebene liegt und den Stein abbremst.

Bei kleinen Auftreffwinkeln können wir das (Betrags-)Quadrat der Geschwindigkeit v als konstant annehmen; im Wesentlichen ist also die Auftriebskraft proportional der wirksamen Fläche A und damit nur abhängig von der Eindringtiefe z, gemessen am tiefsten Punkt des Steins.

Ist obendrein A proportional zu z, so liegt die Situation des harmonischen Oszillators vor: Wie bei der Masse an der Schraubenfeder ist die rücktreibende Kraft proportional der Auslenkung. In diesem Fall vollführt der Stein, ebenso wie der Oszillator, eine Sinusschwingung, aber nur eine halbe, denn dann ist er aufgetaucht und fliegt weiter.

Die Bedingung »A proportional zu z« ist zwar sehr realitätsfern: Sie würde allenfalls von einem quadratischen Stein erfüllt, der genau parallel zu einer seiner Seiten eintaucht. Aber es kommt so genau gar nicht darauf an. Wenn die Rückstellkraft nur irgendwie, nicht unbedingt linear, mit der Eindringtiefe zunimmt und von nichts anderem abhängt, vollführt der Stein eine »Bewegung in einem Potenzialfeld«. Für diesen Fall liefert die Theorie immerhin das Ergebnis, dass der Stein mit derselben Vertikalgeschwindigkeit aus dem Wasser springt wie hinein, nur mit umgekehrtem Vorzeichen.



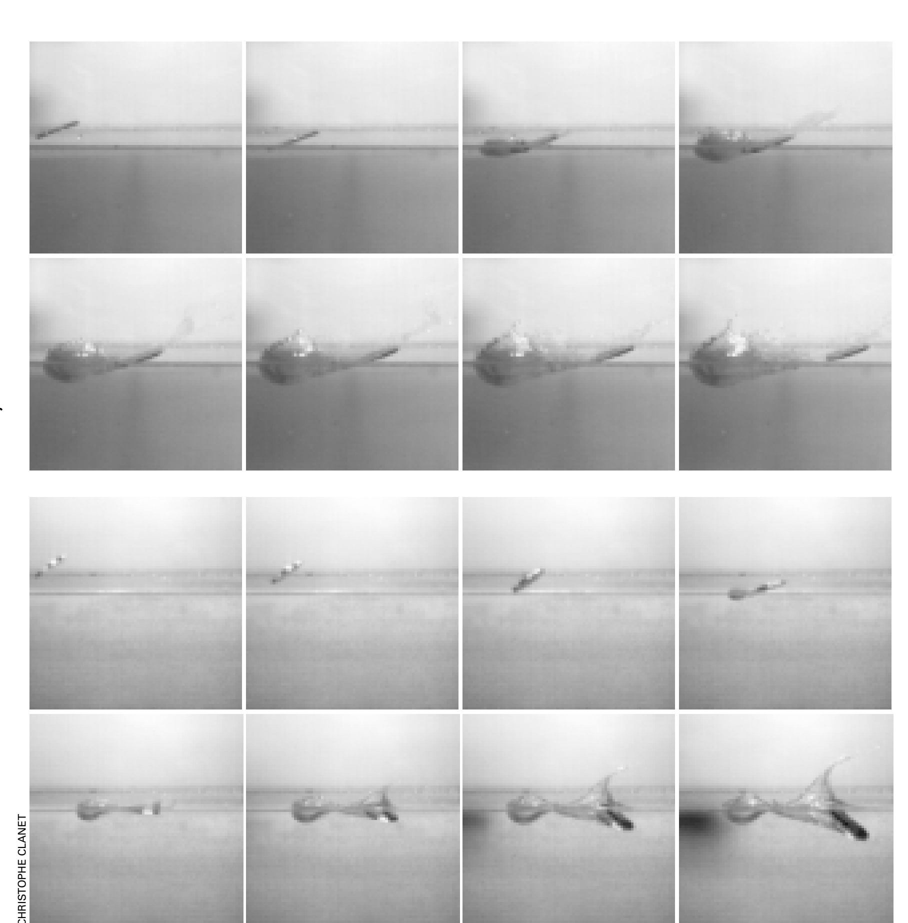
Mit etwas Rechenarbeit lässt sich für einen kreisförmigen Stein sogar die maximale Eindringtiefe in Abhängigkeit von v bestimmen: Je langsamer der Stein auftrifft, desto tiefer sinkt er zunächst. Aus der Bedingung, dass nicht die ganze Unterseite des Steins das Wasser berühren darf, ergibt sich eine minimale Auftreffgeschwindigkeit. Für einen Stein von 10 Zentimeter Durchmesser und 100 Gramm Masse sowie Auftreff- und Anstellwinkel von jeweils 10 Grad berechnet Lydéric Bocquet eine Minimalgeschwindigkeit von ungefähr einem Meter pro Sekunde.

Eine noch restriktivere Bedingung ergibt sich aus dem Geschwindigkeitsverlust durch Reibung. Dieser lässt sich zumindest qualitativ bestimmen, wenn man nicht über die Geschwindigkeit v selbst, sondern über die kinetische Energie $E = mv^2/2$ nachdenkt. Der Energieverlust durch Reibungsarbeit ist grob geschätzt gleich Kraft mal Weg, genauer: gemittelte Widerstandskraft mal Gleitweg des Steins übers Wasser. Die Widerstandskraft ist aus geometrischen Gründen proportional der Auftriebskraft, und deren gemittelter Wert ist etwas größer als das Gewicht des Steins, denn immerhin hält sie dem Stein nicht nur die Waage, sondern kehrt sogar den vertikalen Anteil seines Impulses um. Der Gleitweg ist überraschenderweise unabhängig von der Geschwindigkeit: Ein schneller Stein steigt zwar eher aus dem Wasser als ein langsamer, legt aber dabei keinen kürzeren Weg zurück – weil er eben schneller ist. Für seinen Modellstein errechnet Bocquet einen Gleitweg von 13 Zentimetern. Und wenn seine Geschwindigkeit unter 2 Meter pro Sekunde läge, würde sein erster Besuch auf der Wasseroberfläche seine kinetische Energie bereits vollständig aufzehren.

Bei jedem Auftreffen verliert der Stein also eine konstante Menge an kinetischer Energie, bis sie auf null abgesunken ist. Wer viele Sprünge erreichen will, muss seinem Stein also vor allem reichlich Anfangsgeschwindigkeit mitgeben – zwölf Meter pro Sekunde beim Modellstein, wenn er den Weltrekord von 38 Sprüngen erreichen soll.

Die Geschwindigkeit ist der Wurzel aus der kinetischen Energie proportional und nimmt daher nicht linear ab, sondern eben wie eine Wurzelfunktion in der Nähe der Null: erst langsam und dann zunehmend schneller. Gleiches gilt für die Sprungweite. Deswegen macht der Stein noch ein paar winzige Hüpfer (»pitty-pat« nennen es die Fachleute), bevor er (»plonk«) endgültig absäuft.

Bei den Experimenten von Christophe Clanet und Fabien Hersen dringt eine rotierende Aluminiumscheibe ins Wasser ein, wirft einen kleinen Wellenberg auf und fliegt wieder davon (obere Bilderserie). Ohne Rotation kippt die Scheibe nach dem Eindringen um, taucht mit der Vorderseite ins Wasser und versinkt (untere Serie).


CHRISTOPHE CLANET

tiert zu werden wie ein Steinchen auf dem Wasser. Wehe den Insassen eines Spaceshuttles, wenn der Pilot bei dem Versuch, einen besonders sanften Abstieg einzuleiten, das Fluggerät versehentlich ein Stück mondwärts schleudert!

Es gab sogar eine sehr ernsthafte Anwendung für die nette kleine Spielerei – eine tödliche. Anstelle harmloser Kiesel ließen britische Kampfpiloten im Mai 1943 rotierende Bomben über die Oberfläche des Möhnestausees im Sauerland hüpfen. Auf diese Weise übersprang zumindest eine Bombe die im Wasser aufgehängten Fangnetze und riss ein großes Loch in die Staumauer. In der dadurch ausgelösten Flutwelle starben ungefähr 1600 Menschen.

Das widerspenstige Thema fand jahrzehntelang kaum Bearbeiter. Nachdem 1957 im »Scientific American« ein emeritierter Anglist namens Ernest Hunter Wright die herkömmliche Vorstellung über den wasserspringenden Kiesel in Frage gestellt hatte, weil ein über nassen Sand hüpfender Stein kurze und lange Sprünge im Wechsel vollführe, gab es zwar eine Flut von Spekulationen, aber elf Jahre lang nichts Handfestes. Erst 1968 führte Kirston Koths, Student am Amherst College in Massachusetts, Experimente mit Stroboskop und Hochgeschwindigkeitskamera durch und fand – was Wunder –, dass seine eigens gefertigten Steine auf Wasser völlig anders sprangen als auf Sand. Auf seinen Fotografien kann man zumindest erahnen, dass der Stein gleich dem Wasserskifahrer eine Bugwelle aufwirft.

Eine theoretische Analyse hat erst im vergangenen Jahr Lydéric Bocquet vom Fachbereich Materialwissenschaften der Universität Lyon durchgeführt. Aber selbst sein sechsseitiger, formelreicher Artikel muss an vielen Stellen zeitlich veränderliche Größen wie Orte und Geschwindigkeiten durch Durchschnittswerte ersetzen, manches vereinfachen und Dinge wie die Bugwelle gänzlich vernachlässigen. Immerhin ergeben sich aus seiner Arbeit realistische Werte für die Mindestgeschwindigkeit eines Steins, der springen soll, und eine Erklärung dafür, warum gegen Ende des Weges die Sprungweite so rapide abnimmt (siehe Kasten).

Neue Experimente: Bocquets Werk inspirierte seine Kollegen Christophe Clanet vom Forschungsinstitut für Nichtgleichgewichtsphänomene in Marseille und Fabien Hersen von der École Polytechnique in Palaiseau bei Paris zu neuen Anläufen. Sie konstruierten eine Wurfmaschine, mit der sie die entscheidenden Parameter Anstellwinkel θ, Auftreffwinkel β, Abwurfgeschwindigkeit und Drehzahl exakt einstellen konnten. Anstelle von Steinen verwendeten sie Aluminiumscheiben mit 5 Zentimeter Durchmesser und knapp 3 Millimeter Dicke. Den Drall, den ihre Maschine der Scheibe gibt, kann kein menschlicher Werfer nachmachen: Mit 65 Umdrehungen pro Sekunde brummt die Scheibe zu Wasser (Bild oben)!

Das Ergebnis der Experimente ist eine echte Überraschung. Entgegen der allgemeinen Vorstellung sind die flachsten Winkel nicht die besten. Die Aluminiumscheiben hüpfen am bereitwilligsten, selbst bei niedrigen Geschwindigkeiten, wenn die Winkel β und θ beide möglichst wenig von dem Wert 20 Grad abweichen. Genau dann ist auch die Zeit, die sich die Scheibe im Wasser befindet, minimal. Eine kurze Nasszeit wiederum bedeutet geringen Energieverlust und damit bei gegebener Anfangsgeschwindigkeit eine große Anzahl an Sprüngen.

Ob der nächste Weltrekord-Aspirant daraufhin seine Wurftechnik ändert? ◁



Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Secrets of successful stone-skipping. Von Christophe Clanet, Fabien Hersen und Lydéric Bocquet in: Nature, Bd. 427, Nr. 1, S. 29, 1. Januar 2004

The physics of stone skipping. Von Lydéric Bocquet in: American Journal of Physics, Bd. 71, Nr. 2, S. 150, Februar 2003; Download unter dpm.univ-lyon1.fr/~lbocquet/AJPricochet.pdf

The amateur scientist. Von C. L. Stong in: Scientific American, S. 112, August 1968

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Verschmutzung der Pole mit Quecksilber

Die globale Erwärmung bewirkt, dass sich ausgerechnet an den Polen – den entlegensten und saubersten Regionen der Erde – hochgiftiges Quecksilber aus der Luft im Eis ansammelt

AWI BREMERHAVEN

WEITERE THEMEN IM MAI

Kosmische Sinfonie

Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung zeigen, dass das Universum nach dem Urknall von harmonischen Schwingungen widerhallte: Das urtümliche Plasma vibrierte wie die Luft in einer Orgelpfeife



BRYAN CHRISTIE DESIGN

Wandel der Gezeiten

Wie Seefahrer und Gelehrte im Lauf der Jahrhunderte ein geophysikalisches Phänomen zu erklären suchten



GRIFFWASON

Neue Ansichten vom Mars

Fast täglich liefern die Sonde Mars Express und die Roboterfahrzeuge Spirit und Opportunity Aufsehen erregende Daten zur Erde. Demnach muss der Rote Planet in seiner Frühzeit über Unmengen Wasser verfügt haben.

SASAKI / PHOTO RESEARCHERS, INC.

Geschlechtsverschiebung im Uterus

Geschlechtsmerkmale beim Ungeborenen bilden sich weniger deutlich aus, wenn fremde Hormone wirken. Neue Chemikalien mit hormonähnlichen Wirkungen stellen heute eine besondere Gefahr dar